



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Miikka Uutinen

Hybridilämmitys- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikka
Insinöörityö
10.2.2020

Tekijä Otsikko	Miikka Uutinen Hybridilämmitys- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelu
Sivumäärä Aika	49 sivua + 1 liite 10.2.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Aki Valkeapää osastonjohtaja Tuomas Lehikoinen
<p>Insinööriyön tavoitteena on kehittää Granlund Kuopion Oy:n toimintaa maalämpösuunnittelun parissa. Maalämpösuunnitteluosaamista tarvitaan ja tulevaisuuden kannalta, kovaa vauhtia yleistyvään järjestelmään liittyvien töiden osaaminen on eduksi. Työn aiheena on koulukohteen hybridilämmitys- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelu.</p> <p>Teoriaosuudessa kerrotaan maalämmöstä yleisellä tasolla ja siihen liittyvä mitoitus käydään pääpiirteittäin läpi. Järjestelmän ympäristöhyödyt ja ekologisuus ovat ilmastonmuutoksen kannalta tärkeitä. Kaukolämmön ollessa lisälämmönlähteenä teoriaosuudessa avataan lisäksi hieman kaukolämpöä.</p> <p>Työssä perehdyttiin maalämpösuunnittelun eri vaiheisiin. Lähtötietojen hankinnan vaiheet ja tulosten tarkastelu sekä työssä tarvittavien ohjelmistojen käyttö avataan lukijalle. Ammattitaitoa kehittävä osuuden eli GLHEPro-simulointityökalun opettelu ja simuloinnin eri vaiheet käydään kohta kohdalta läpi.</p> <p>Tuloksena syntyi kattava kokonaisuus maalämpöjärjestelmän eri vaiheista, joita voidaan hyödyntää tulevaisuuden suunnittelutöissä. Lähtötietojen hankinta sekä tulkitseminen onnistui ja simuloinnit saatiin suoritettua. Työn aihe oli hyvä ja kattava, sillä projektilla oli kehittävä vaikutus ammatilliseen osaamiseen ja työn tuomiin tuloksiin voi olla tyytyväinen.</p>	
Avainsanat	maalämpösuunnittelu, energiakaivo, simulointi

Author Title	Miikka Uutinen Design of Hybrid Geothermal Heating and Cooling Production Systems
Number of Pages Date	49 pages + 1 appendix 10 February 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC engineering, Design Orientation
Instructors	Aki Valkeapää, Principal Lecturer Tuomas Lehtikoinen, Department Manager
<p>The purpose of this final year project was to expand a company's operations in geothermal heating engineering by looking into the design of hybrid geothermal heating and cooling production systems.</p> <p>The project investigated the different stages of designing geothermal systems, the output data of the systems and the interpretation of the data. Furthermore, the necessary simulation tools for the design of these kinds of systems were looked into.</p> <p>As the result, a comprehensive description of the stages of the design of geothermal system was created. The acquisition of output data and its interpretation were successful, and all necessary simulations were performed. The project was great and versatile and yielded very satisfactory results.</p>	
Keywords	geothermal heating, geothermal cooling, heating production, cooling production

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Granlund Kuopio Oy	1
2.1	Maalämpösuunnittelu ennen	2
2.2	Maalämpösuunnittelu tulevaisuudessa	2
3	Maalämpö	3
3.1	Maalämmön edut	5
3.2	Maalämpöjärjestelmä	5
3.3	Maalämpökenttä ja energiakaivot	7
3.4	Toimivuus ja riskit	9
4	Kaukolämpö	9
5	Suunnittelussa käytetyt ohjelmistot	11
5.1	MagiCAD ROOM	13
5.2	RIUSKA	13
5.2.1	Toiminnot	14
5.2.2	Asetukset ja säätiedot	15
5.2.3	Kirjastot ja lämpökuormat	15
5.2.4	Järjestelmät	18
5.2.5	Ilmanvaihtokoneet sekä palvelualueet	19
5.2.6	Simulointien ja laskelmien tulokset	21
5.3	GLHEPro	24
6	Hybridilämmitys- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelu	26
6.1	Maalämpöjärjestelmän mitoitus	27
6.2	Lähtötiedot	28
6.3	Simulointi	34
6.4	Kytkentäkaavio	44
6.5	Toimintaselostus	45
7	Yhteenveto	47

Liitteet

Liite 1. Haastattelu

Lyhenteet

COP	Coefficient of performance. Hyötysuhde, lämpöpumpun tehokkuutta kuvaava lämpökerroin.
SCOP	Seasonal coefficient of performance. Vuosihyötysuhde, lämpöpumpun tehokkuutta kuvaava lämpökerroin.
TRT	Thermal response test. Lämpökentän lämmönjohtavuuden, kallion häiriintymättömän lämpötilan sekä porakaivon vastuksen selvittämiseen suoritettava mittaus. [20]

1 Johdanto

Insinööritö tehdään Granlund Kuopio Oy:n toimeksiantona. Kuopion Granlundilla on tarve laajentaa maalämpösuunnitteluosaamista sekä oppia tekemään energiakaivokenttien mitoituksia simulointityökalujen avulla. Työn tavoitteena on käsitellä laajemmin energiakaivokentän mitoitusta sekä järjestelmän optimointia ja erityisesti kehittää energiakaivokenttä- sekä lämpöpumpputuntemusta. Kuopion toimipisteellä ei ole ennen työn aloittamista ollut osaamista energiakaivokentän mitoituksesta simulointityökalujen avulla.

Insinööritöissä kerrotaan koulukohteen hybridilämmityksen- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelun vaiheista, niiden tarkoituksesta sekä sisällöstä. Työn teoriaosuudessa perehdytään pääasiassa maalämpöön, siihen kuuluvaan järjestelmään sekä mitoituksen eri vaiheisiin kaukolämmön ollessa sen lisälämmönlähteenä.

Työssä perehdytään suunnitteluprosessin aikana käytössä oleviin ohjelmistoihin sekä niiden merkitykseen maalämpösuunnittelun näkökulmasta. Työn pääpaino on GLHEPro-nimisen simulointityökalun käytössä ja sen käyttämiseen tarvittavien lähtötietojen hankinnassa sekä siinä, mitä tulee huomioida tarvittavien lähtötietojen hankkimisessa ja tulkitsemisessa. Työssä käydään läpi myös se, miten ohjelmiston käytön harjoittaminen eroaa yrityksen entisistä toimintatavoista.

2 Granlund Kuopio Oy

Granlund Oy on vahvasti kasvava kiinteistö- ja rakennusalan asiantuntijakonserni, jonka päätoimipiste sijaitsee Helsingin Malmilla. Toiminta on aloitettu jo vuonna 1960 ja nykyään palveluita tarjotaan niin koko Suomessa kuin eri puolilla maailmaa. [1] Vuonna 2019 Granlundin henkilöstön lukumäärä oli yli 900 sekä liikevaihto yli 90 miljoonaa euroa.

Konserniin kuuluva tytäryhtiö Granlund Kuopio Oy on puolestaan perustettu vuonna 1969. Nykyään se tarjoaa Itä-Suomen kattavimman asiantuntemuksen, taloteknisen suunnittelun ollessa sen isompia tukipilareita. [2]

2.1 Maalämpösuunnittelu ennen

Rakennuksen energiantarpeen selvittäminen on perustunut aina tuntikohtaisen energian laskentaan. Tuntitasolaskentaa on jatkuvasti kehitelty uusilla excel-taulukoilla, joilla selvitetään lämpöpumpun energianpeittoaste ja maasta saatavan energian määrä. Maalämpösuunnitteluun liittyvä energiakaivokentän mitoitus on aikaisemmin arvioitu laskelmalla; energiantuotto metriä kohden, johon on otettu lisäksi varmuutta päälle. Viimeiset pari vuotta on kuitenkin tukeuduttu Granlund Consultingin osaamiseen. Lämpöpumppu-mitoituksessa puolestaan on konsultoitu laitetoimittajaa. Edellä mainitut mitoistavat ovat olleet maalämpösuunnittelun toteutuksen perusta. [3]

2.2 Maalämpösuunnittelu tulevaisuudessa

Insinööriyön yksi keskeisimmistä tavoitteista oli kehittää maalämpösuunnittelun toimintaa Kuopion toimipisteellä. Tulevaisuudessa tavoitellaan Kuopioon laaja-alaista ja kokonaisvaltaista lämpöpumppusuunnittelun osaamista ja asiantuntijuutta. Tärkeimpänä voidaan pitää lämpökentän simulointityökalujen käytön osaamista ja harjoittamista. [3]

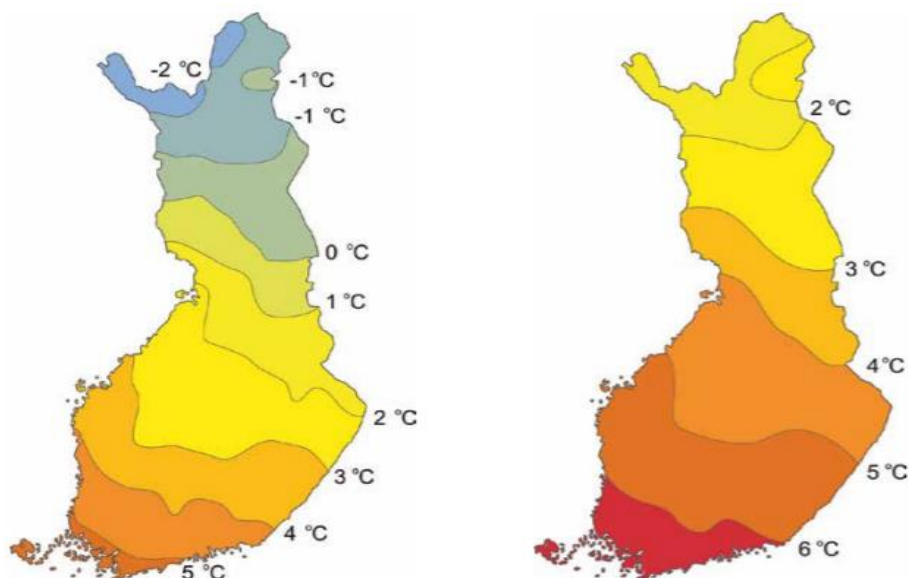
Aikaisemmista toteutustavoista siirryttäessä ja simulointityökalujen käytöllä varmistetaan, ettei lämpökenttää yli- tai alimitoiteta. Ylimitoittaessa maksetaan turhasta ja maalämpöjärjestelmän taloudellinen kannattavuus kärsii. Alimitoittaessa vaarana on lämpökentän jäätyminen, joka tapahtuu, kun energiakaivokentän lämpötila alenee ja näin ollen maasta saatava energiamäärä laskee. Kun saatava energiamäärä ei riitä kattamaan rakennuksen lämmitysenergian tarvetta, käytetään rinnakkaislämmönlähteitä ja samalla järjestelmän kannattavuus heikkenee. Oikeanlaisen kaivokentän suunnittelu on siinäkin mielessä tärkeää, että energiakaivojen lisääminen myöhemmin voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Energiakaivokentälle tulee suorittaa TRT-mittaus, kun kaivoja on 5 tai enemmän. Lopullinen mitoitus tehdään mittauksen jälkeen. [3]

3 Maalämpö

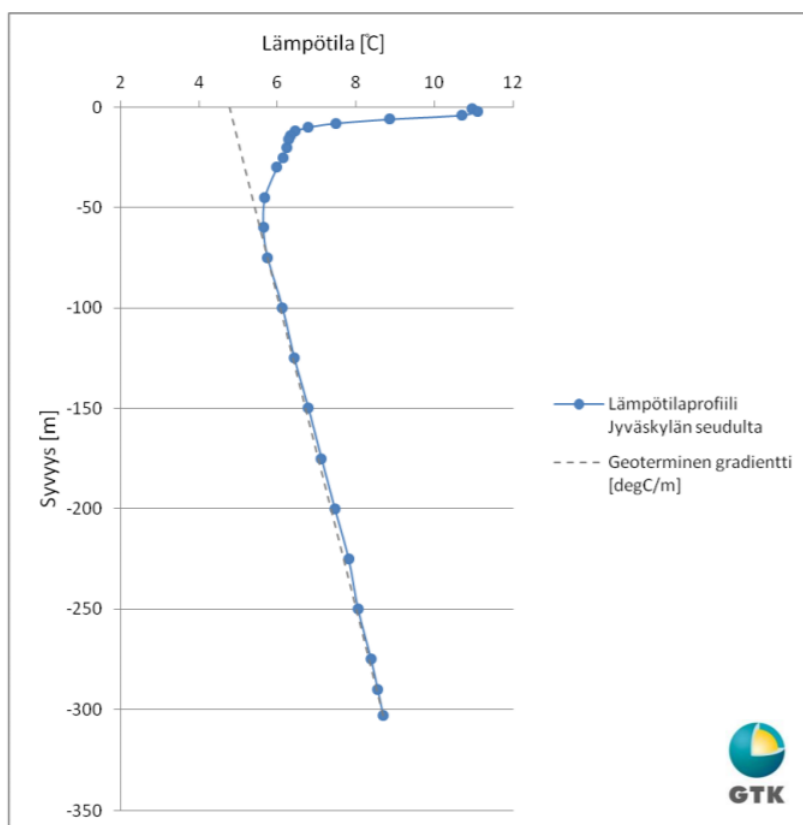
Maalämpö on uusiutuva energianlähde, joka sitoutuu maa- ja kallioperään sekä vesistöihin auringon säteilyn kautta. Auringonpaisteen lisäksi energiaa sitoutuu maan pintaan myös lämpimän ilman ja sateiden välityksellä. Maalämmöstä hieman poikkeava geoterminen energia syntyy puolestaan maan syvemmissä kerroksissa radioaktiivisen hajoamisen tuloksena. [4]

Suomen sijainnin seurauksena vuotuinen ilman keskilämpötila on suhteellisen alhainen, ja alueen maantieteellisen sijainnin mukaan maanpinnan vuotuinen keskilämpötila on 2–6 °C (kuva 1). Vuodenajoista johtuvat ilman lämpötilaerot saavat aikaan maanpinnan keskilämpötilojen vaihtelut. Syvemmällä noin 20 metrin syvyydessä lämpötila on vakio. Suomessa kallioperän lämpötilan kasvu johtuu geotermisistä energioista, jotka nostattavat lämpötilaa 0,8–1,5 °C sataa metriä kohden. Tätä kuvaamaan on tehty geoterminen gradientti (kuva 2). [5]

Suomessa kallioperän lämmönjohtavuudessa ei ole kovin suurta vaihtelua, kvartsipitoista kallioperää lukuun ottamatta. Lämmönjohtavuuden vaihteluväli on 2–4 W/(m·K). Kallioperän lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa kiviaines, sen rikkonaisuus sekä pohjavesiolosuhteet. Lämmönjohtavuudella on suuri merkitys porakaivojen määrän ja syvyyden suhteen. Tämän takia tehdään mittauksia maaperästä, jotta järjestelmä saadaan kunnollisesti mitoitettua. [4; 6.]



Kuva 1. Ilman lämpötilan vuotuinen keskiarvo vertailukaudelta 1971–2000 (vasen) ja maanpinnan vuotuinen keskilämpötila (oikea) [4].



Kuva 2. GTK:n mittaama lämpötilaprofiili sekä lämpötilan nousunopeus eli geoterminen gradientti [5].

3.1 Maalämmön edut

Noin kaksi kolmasosaa maasta saatavasta energiasta on ilmaista, kun lämpöpumppu kuluttaa sähkön ostoenergiaa noin kolmasosan tuotettavasta energiasta [6]. Maalämpöjärjestelmän hankintakustannukset ovat korkeat, mutta tekniikan kehittyessä, komponenttien hintojen alentuessa ja sähkön hinnan noustessa takaisinmaksuaika puolestaan pienenee. Maalämpöjärjestelmien hankinta onkin viime vuosina ollut räjähdysmäisessä kasvussa, johtuen osittain jo pitkään jatkuneesta matalasta lainojen korkotasosta [7]. Jatkuvasti kehittyvän ja kasvavan käytön myötä kokemus lisääntyy ja näin ollen keksitään keinoja hyödyntää järjestelmiä entistä tehokkaammin [4].

Maalämpöjärjestelmillä saavutetaan merkittäviä energiasäästöjä sekä ympäristöhyötyjä sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöjen ja terveydelle haitallisten pienhiukkasten vähenemisellä [7]. Hiilidioksidipäästöt ovat sähkölämmitykseen ja öljylämmitykseen verrattuna 60 % pienemmät. Usein myös kiinteistön arvo nousee tällä sijoituksella. Maalämpöjärjestelmä on tehokkaimmillaan, kun sitä käytetään myös jäähdytykseen. Toisin sanoen lisäämällä jäähdytys järjestelmän hyötysuhde paranee, ja ilmaston lämmetessä ekologisen jäähdytyksen, kuten maakylmän, tarve on kasvava [8].

Maalämpöpumppu tarvitsee sähköenergiaa toimiakseen, mutta sen kuluttama sähköenergian määrä on pieni osa sen tuottamaan energiaan verrattuna [4]. Vapaaajäähdytystä viilentämiseen käyttäessä lämpöpumppu on pysähdyksissä ja sähköä tarvitaan vain lämmönkeruupiirin pumpun, puhallinkonvektorin puhaltimien ja jäähdytysvesiverkoston pumpun toimintaan, tuottaen muihin jäähdytysmenetelmiin verrattuna vähiten päästöjä [8]. Suomen olosuhteissa lämpökerroin eli COP-arvo on vuositasolla keskimäärin kolme. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpöpumpun avulla voidaan tuottaa kolminkertaisesti sen toimimiseen ostetun energian määrä [4].

3.2 Maalämpöjärjestelmä

Maalämpöjärjestelmällä tuotetaan suurin osa rakennuksen lämmitykseen käytettävästä energiasta. Samalla järjestelmä lämmittää kohteen käyttöveden ja tarpeen mukaisesti maakylmää voidaan käyttää myös jäähdyttämiseen. Maalämpöjärjestelmään kuuluvat

osa-alueet ovat lämpöpumppu, siirtoputkisto sekä lämmönkeruuputkisto, joka kuljettaa energiaa maaperästä, kalliosta tai vesistöstä. [4]

Lämmönkeruuputkistossa kiertävän lämmönkeruunesteen lämpötila riippuu keruutavasta eli siitä, onko kyseessä vaaka- tai pystyputkisto ja pystyputkiston poraussyvydestä. Keruuputkistossa lämmönkeruuneste lämpenee 1–4-asteiseksi. Keruunesteen lämpö siirretään lämpöpumpun höyrystimessä kylmäaineeseen ja edelleen lämpöpumpulla lauhduttimen kautta varaajaan ja varaajasta verkostoon [8]. Maalämpöjärjestelmä vaatii vesikiertoisien lämmönjakojärjestelmän, joista yleisimpiä ovat lattialämmitys sekä vesikiertoiset patterit [9].

Keruuputkistossa kiertää yleisimmin neste, jonka alkoholipitoisuus on 25–30 %. Höyrystimessä keruupiirin neste höyrystää lämpöpumpussa olevan kylmäaineen kaasuksi, jonka painetta nostetaan sähköisen kompressorin avulla. Lauhduttimeen johdettava kaasu jäähtyy ensin ja sen jälkeen lauhtuu nesteeksi, jolloin jäähtymisessä ja lauhtumisessa vapautuva lämpö siirretään lauhduttimesta varaajaan. Lämpöpumpulla voidaan tehdä maksimissaan noin 65–68-asteista vettä. Lauhduttimen jälkeen kylmäaine virtaa paisuntaventtiilin läpi, sen paine alenee ja lämpötila laskee (kuva 3). [8]

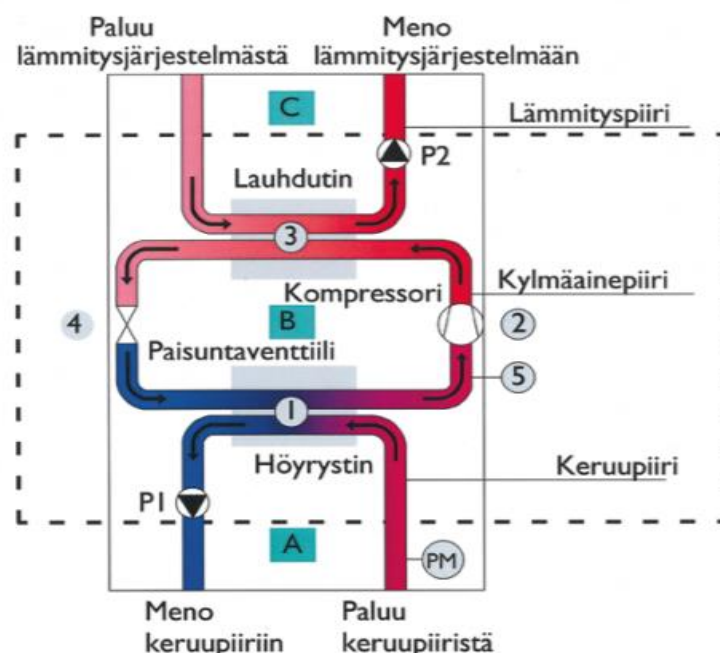
Yksi yleisimmistä käyttöveden lämmittämiseen liittyvistä ominaisuuksista on lämpöpumpun ohjausjärjestelmän kyky päättää, tuotetaanko lämmintä käyttövettä vai rakennuksen lämmittämiseen käytettävää vettä. Tarpeen mukaisesti molemmille löytyy varaajat. Lämpöpumpun tuottamaa lämmintä vettä ohjataan varaajiin vaihtaventtiilin avulla. Varaajien koko ja mitoitus perustuvat rakennuksen käyttöveden kulutukseen. [8]

Maalämpöjärjestelmä voidaan mitoittaa täystehoiseksi tai osatehoiseksi. Osatehoiseksi mitoittaessa maalämmöllä ei voida kattaa koko rakennuksen tarvitsemaa lämmitysenergiaa ja tällöin tulee rinnalle valita vaihtoehtoinen lämmitysmuoto. Vaihtoehtoisia lämmitysmuotoja ovat maalämpöpumppuun sisäänrakennettu sähkövastus ja kaukolämpö. Muitakin vaihtoehtoja on. Lämmityksen lisäksi maaviileän avulla rakennusta voidaan myös jäähdyttää. [8]

Pientaloissa maaviileän hyödyntämiseen tarvitaan puhallinkonvektori. Puhallinkonvektorin sisältämän puhaltimen avulla huoneilma kierrätetään tämän lämmönsiirtimen läpi.

Lämmönsiirtimessä kiertää myös keruuputkistossa kiertävä neste, jonka kierrosta vastaa siihen tarkoitettu kiertovesipumppu. Neste kerää itseensä huoneilman lämpöä ja vie sitä takaisin maaperään. Isommissa kohteissa, joissa on suuri jäähdytystarve, voidaan jäähdytys hoitaa esimerkiksi kaukokylmän sekä vesilauhdutteen jäähdyttimen avulla. [8]

Lämmönkeruuneste on veden ja liuoksen jäätymätön seos. Suomessa yleisimmin käytetty lämmönkeruuneste on vesi-etanoli-seosta, sen ympäristöystävällisyyden vuoksi. Muitakin lämmönkeruunesteitä on ja niiden ominaisuudet poikkeavat hieman toisistaan. Tärkeimpinä ominaisuuksina pidetään kuitenkin alhaista jäätymispistettä, hyvää lämmönjohtavuutta, korkeaa ominaislämpökapasiteettia sekä sen tulisi olla palamatonta, myrkytöntä, biologisesti hajoavaa ja yhteensopiva muiden aineiden kanssa. [4]



Kuva 3. Maalämpöpumpun toiminta sekä siihen kuuluvat osat [4].

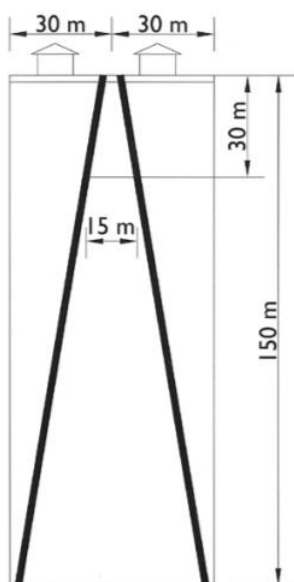
3.3 Maalämpökenttä ja energiakaivot

Maalämpökenttä eli energiakaivokenttä on useammasta energiakaivosta koostuva maalämpöjärjestelmä, joka tulee suunnitella huolellisesti. Energiakaivokentän suunnittelun lähtökohtana on energiakaivojen syvyyden ja määrän selvittäminen. TRT-mittauksen

avulla selvitetään energiakaivon lämmönvastus, jonka avulla voidaan suunnitella kohteen tarpeita vastaava sekä kustannustehokas energiakaivokenttä. [10]

Maalämpöjärjestelmiä koskevia määräyksiä sekä rajoituksia voi olla kuntakohtaisestikin. Yleisin määräys on lämmönkeruunesteen haitattomuus ympäristölle sekä kaivojen sijoittamisen rajoitteet tontilla [4]. Energiakaivojen välisen etäisyyden on oltava vähintään 15 metriä. Joissakin tapauksissa kaivon sijoittaminen minimietäisyyden päähän ei ole mahdollista ja tässä tapauksessa kaivot voi porata vinottain (kuva 4). Kaivoa ei myöskään voida porata rakennuksen viereen, etäisyys rakennuksesta pitää olla vähintään 3 metriä. Sijoittamisessa on otettava huomioon myös rakennuksen tekninen tila: mitä lähempänä, sen parempi [8].

Energiakaivojen syvyydet vaihtelevat rakennuksen lämmitysenergian tarpeen mukaisesti. Syvimmillään energiakaivoja porataan noin 800 metriin asti ja keskimäärin lämpökaivon syvyys on 300–500 metriä, riippuen maa- ja kallioperästä. Energiakaivoissa lämpö siirtyy kallioperästä lämpökaivon seinämän kautta veteen ja edelleen kollektori-putken kautta lämmönkeruunesteeseen pääasiassa johtumalla. [8]



Kuva 4. Esimerkki vinoon porattavien kaivojen kaltevuudesta. Vinoon porattavien energiakaivojen minimietäisyys tulee kuitenkin olla vähintään 5 metriä lähtöpisteessä. [4]

3.4 Toimivuus ja riskit

Maalämpöjärjestelmän on todettu olevan toimiva, luotettava, pitkäaikainen ja järkevä sijoitus, mutta silläkin on omat riskinsä. Suurimmassa osassa tapauksista ongelmat liittyvät järjestelmän toimintaan, jotka ovat todennäköisemmin peräisin suunnittelu- ja mitoitusvirheistä. Alimitoitettu keruupiiri tarkoittaa, ettei maaperästä saada haluttua määrää energiaa, eikä näin ollen energiamäärä riitä rakennuksen lämmittämiseen. Hyötysuhde kärsii eli tuotetun energian määrä pienenee käytettyyn sähkötehoon nähden. Joskus myös kaivojen väliset etäisyyden heikentävät energian saantia, kun liian lähekkäin asennetut energiakaivot keräävät energiaa samalta alueelta. [4]

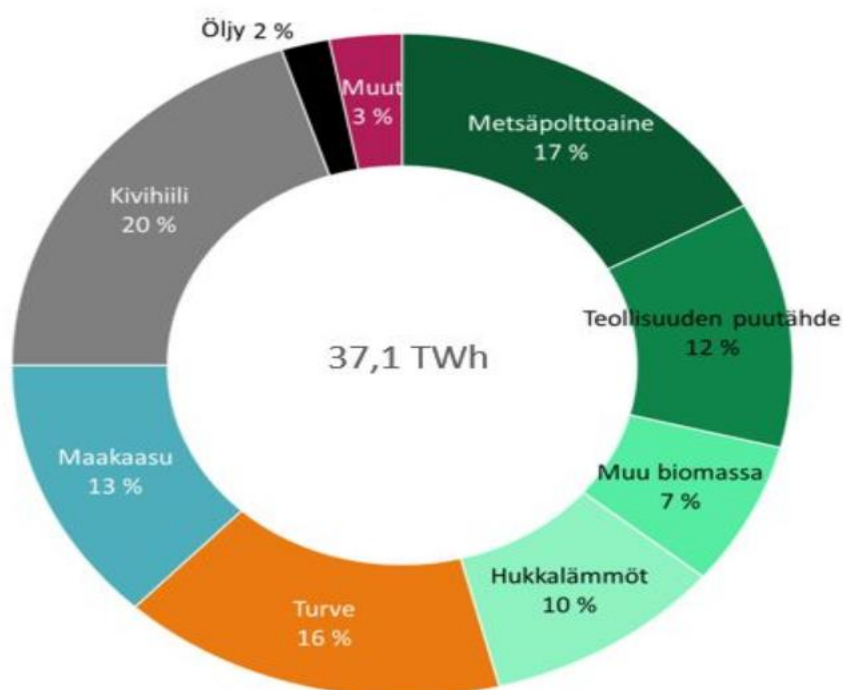
Maalämpöjärjestelmään liittyy myös ympäristöriskejä, kuten pohjaveden pilaantuminen. Pilaantuminen voi tapahtua joko suoraan tai välillisesti, jota aiheuttavat poraaminen ja kaivuutyöt, pilaantuneen maa-aineksen tai huonolaatuisen pinta- tai pohjaveden sekoittuminen makeaan veteen ja pohjaveden lämpötilamuutokset. Orsivesikerroksen alla olevan savikerroksen puhkeamisen voi aiheuttaa energiakaivojen poraaminen, jolloin sen taso laskee ja pohjavesi puolestaan nousee. Orsivesikerroksen puhkeamisen seurauksena voi pohjaveden laatu heikentyä. Porauksen aikana myös virtausolosuhteet pohjavedessä voivat muuttua, joka vaikuttaa pohjaveden määrään. [4]

4 Kaukolämpö

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto, joka on erityisesti kaupunkien ja taajamien suosiossa. Kaikkialla sitä ei ole saatavilla, sillä se vaatii kaukolämmön jakeluverkon. Valitessaan kaukolämmön, tulee asiakkaan liittyä kaukolämpöverkkoon. Asiakas ottaa vastaan lämmön kaukolämpökeskuksessa, josta lämmönsiirtimen kautta lämpö siirtyy talon omiin lämmitysjärjestelmiin. Verkostossa virtaava eli asiakkaalle tuleva vesi on 65–115-asteista, vuodenajasta riippuen. Viilentynyt vesi palaa paluuputkea pitkin lämmöntuotantolaitokseen, jossa se lämmitetään uudelleen. Kaukolämmön kuumaa vettä tuotetaan voimalaitoksissa, jonka polttoaineena käytetään pääasiassa maakaasua, kivihiiltä, turvetta ja puuta (kuva 5). [11]

Kaukolämpöputket venttiileineen toimitetaan valmiina aina lämmönmittauskeskukselle asti. Asiakkaan teknisessä tilassa olevan lämmönjakokeskuksen osia ovat lämmönsiirrin, pumppu, säätölaitteet, lämpö- ja painemittarit, sulkuventtiilit sekä paisunta- ja varolaitteet. Kaukolämpöä käytettäessä lämmönsiirtimeen tehtävänä on siirtää kaukolämpöverkostosta tulevan kuuman veden lämpöä asiakkaan omiin lämmitysjärjestelmiin. Rakennuksen lämmitystarve sekä käyttöveden kulutus määräävät siirtimeen läpi virtaavan kaukolämpöveden määrän, jota ohjataan venttiileillä. Lämmönsiirtimiä on useita, käyttöveden, lämmityksen sekä ilmanvaihdon vaatiessa omat siirtimet. [11]

Kaukolämpö on ympäristöystävällinen vaihtoehto. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon tuloksena isoissa yksiköissä palaminen sekä keskitetty lämmöntuotanto ja savukaasujen tehokas puhdistaminen parantavat ilmanlaatua merkittävästi. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ollut kaukolämmön valmistamisen tavoitteena ja fossiilisiin polttoaineisiin nähden biopolttoaineiden osuuksia halutaan lisätä jatkuvasti. [11]



Kuva 5. Kaukolämmön polttoaineet energialähteittäin vuonna 2018 [12].

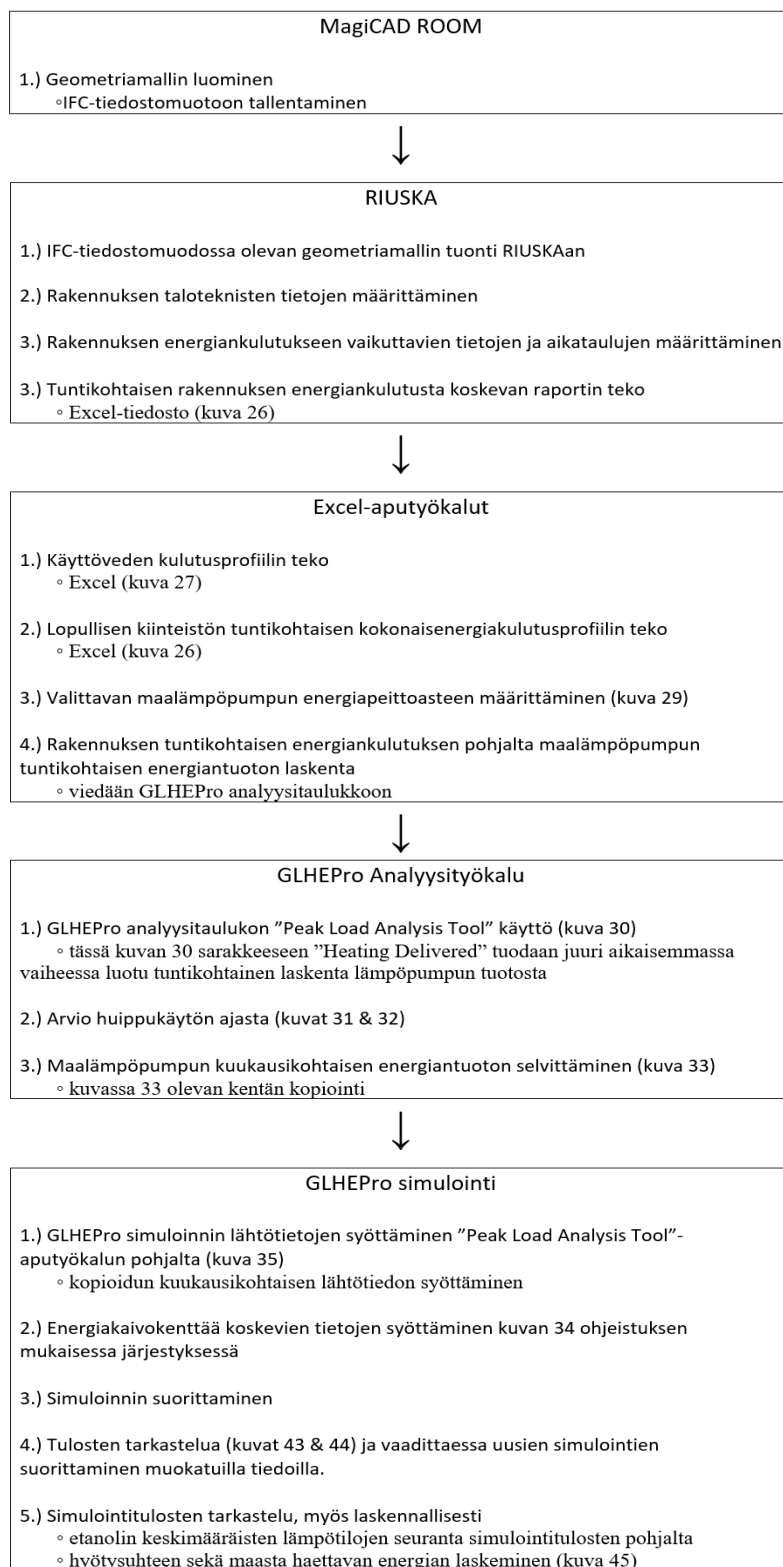
Maalämmön vierelle lisälämmönlähteeksi vaihtoehtoina kohteelle olivat sähkökattila tai kaukolämpö. Sähköä käytettäessä sähköliittymän koko voi kasvaa merkittävästi, ja in-

vestointikustannuslisä voi olla suuri. Kaukolämpö laitteistona on taas huomattavasti kalliimpi kuin sähkökattila sekä kaukolämmön käytössä on mukana olevat käyttökustannukset eli perusmaksu. [3]

Syitä kaukolämmön valintaan löytyy monia. Poliittisesti ajateltuna kunta hyötyy tästä ratkaisusta, ja on kuntien eduksi, että kaukolämmölle saadaan lisää käyttäjiä. Kohde on kunnallinen koulu, ja kaukolämmön ollessa kunnan omistuksessa lisäkäyttäjät tukevat kaukolämpöön sijoitettua rahaa. Lisäksi jo olemassa olevaan kaukolämpöverkoston on helppo liittyä. Vaarana on myös maalämpöjärjestelmän pettäminen, jolloin kaukolämmöllä voidaan korvata maalämmöllä tuotettavan lämmitysenergian osuus, sillä kaukolämpö mitoitetaan aina täystehon mukaan. Sähkökattilalla ei puolestaan pystyittäisi korvaamaan maalämmön tuottamaa osuutta, ja näin ollen kaukolämmön valinta lisää varmuutta rakennuksen järjestelmään. [3]

5 Suunnittelussa käytetyt ohjelmistot

Projektin aikana esiintyviä työvaiheita on useita ja osa niistä tehdään eri työkaluja käyttäen. Ohjelmistojen avulla luodaan geometriamallit, syötetään taloteknistä tietoa kyseisiin geometriamalleihin sekä simuloidaan ja lasketaan, jotta saadaan tarvittavat energiat käyttöön. Näillä energioilla voidaan luoda tuntikohtaista laskentaa ja tämän avulla saadaan mitoitettua maalämpöjärjestelmän energiakenttä. Työn vaiheet on esitetty kuvan 6 vuokaavion avulla.



Kuva 6. Yleiskuvaus maalämpöpumpputekniikan suunnitteluprosessista.

5.1 MagiCAD ROOM

Tietokoneiden käyttö ja sen ominaisuudet kehittyvät päivittäin. Varsinkin suunnitteluun liittyvissä töissä tietokoneohjelmien käyttö on isossa roolissa. Taloteknisissä suunnittelutöissä yleisin ohjelmisto on MagiCAD. Se koostuu kolmesta LVI-suunnitteluun suunnatusta ryhmästä, jotka ovat ilmanvaihdon suunnittelu, lämmityssuunnittelu sekä putkistosuunnittelu. [13]

Tässä työssä on käytetty Progman Oy:n kehittämää MagiCAD ROOM-sovellusta, jonka avulla voidaan luoda kolmiulotteisia tilamalleja, sisältäen rakennuksen geometrian lisäksi tilatietoja. Geometriamallin luominen on yksinkertaista, jossa seinien, ikkunoiden ja ovien lisääminen tapahtuu arkkitehtikuvien pohjalta. Jokaisella rakennuksen mallintamiseen käytettävällä rakenteella on oltava määriteltynä u-arvot sekä ainevahvuudet, jotta voidaan myöhemmin suorittaa tarvittavia energialaskelmia. [14]

Rakennuksessa olevia sisäseiniä piirrettäessä tulee sinne syntyvät yksittäiset tilat määrittää. Tiloille tulee antaa huonenumerot sekä nimet, leikkauskuvien mukaiset kerroskorkeudet sekä ala-, väli- ja yläpohjat, joiden avulla osaa se laskea tilan pinta-alan. Ohjelma automaattisesti myös yhdistää kerroskohtaiset mallinnukset, luoden 3D-mallin koko rakennuksesta. Kun rakennus on mallinnettu, tallennetaan tiedosto IFC-muodossa, minkä jälkeen on mallia mahdollista käyttää toisessa ohjelmistossa pohjana laajemmille laskelmille. [14]

5.2 RIUSKA

RIUSKA on Granlund Oy:n kehittämä, IFC-pohjainen rakennusten energioiden simuloimiseen käytettävä työkalu, jolla saadaan tuloksista erilaisia kokonaisuuksia. Ohjelmalla voidaan laskea koko rakennuksen energiankulutus, lämpöhäviöt sekä tehdä tiloille olosuhdesimulointeja. Yksi keskeisimmistä RIUSKAn kehittämisen tavoitteista on ollut kirjastojen luominen simulointeihin tarvittavien tietojen täydentämisessä. Työssä on käytetty RIUSKAn mallia 5.3.24. [15]

Aikaisemmin luotu ja IFC-tiedostomuotoon tallennettu geometriamalli tuodaan RIUSKAan. Tilamallin geometria eli siihen syötetyt rakenteet ja niiden sisällä olevat tiedot siirtyvät mukana. Energialaskelmat, olosuhdesimuloinnit sekä lämpöhäviölaskelmat edellyttävät tarpeellisten tietojen syöttämistä, ja alla on esitetty, kuinka ja mistä nämä tehdään.

5.2.1 Toiminnot

Kun ROOM-sovelluksella luotu IFC-tiedosto on aukaistu RIUSKalla, on avoinna sen etusivu (kuva 7). Etusivulla näkyy projektin tiedot sekä ohjelmiston tarjoamat työvälineet. Yläpalkissa olevista valikoista voidaan tarkastella asetuksia, kirjastoja, ohjeita sekä laskentatuloksista saatavien tulosten kokonaisuuksia. Vasemmalla palkissa on rakennuksen tiedot sekä geometriamalli, kun taas oikealla on rakennuksen sisältämien tilojen ja rakenteiden yksityiskohtaisemmat tiedot. [15]

The screenshot displays the RIUSKA software interface. At the top, there's a menu bar with options like 'Tiedosto', 'Kirjastot', 'Asetukset', 'Työkalut', 'Tulokset', and 'Ohje'. Below this, a 'Laskentaprojekti:' field is visible. The left sidebar shows a tree view of the project structure, including 'Rakennus' (Building) and 'Kerrokset' (Floors). The main area is divided into two parts: a 3D model of a building on the left and a large data table on the right. The table lists various rooms and their associated construction details, including area, volume, and energy performance metrics.

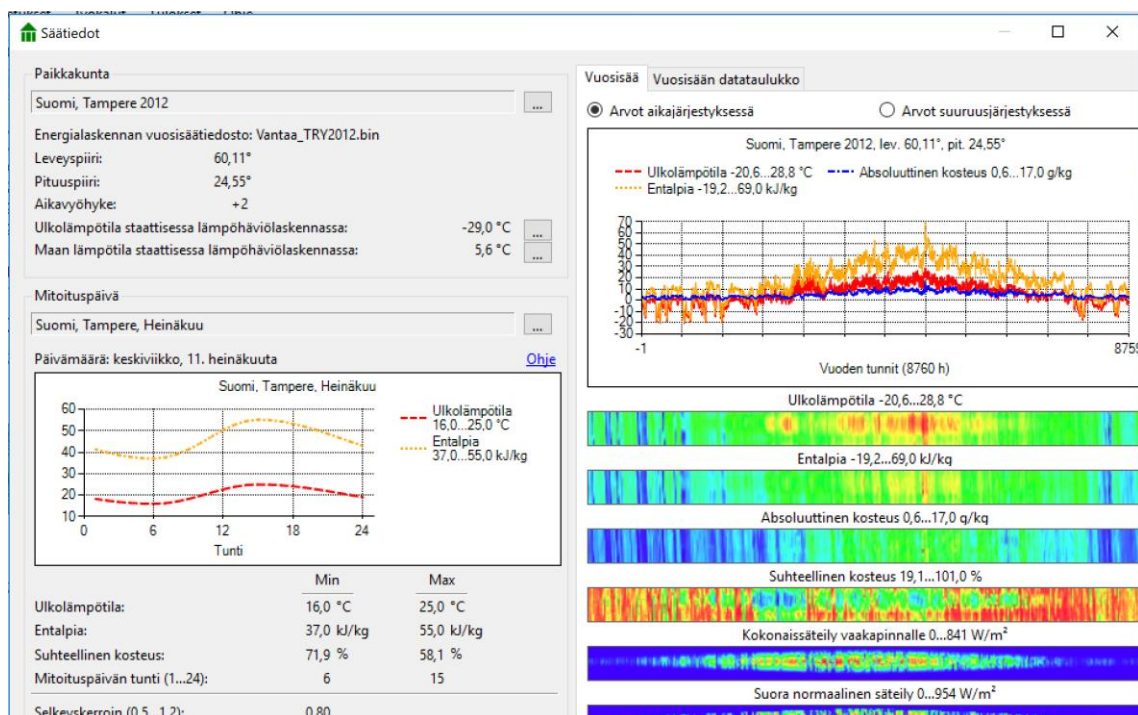
Kerros mm	Tilan tunnus	Tilan nimi	m²	m³	max dm³/s	min dm³/s	max dm³/(s·m²)	min dm³/(s·m²)	W	W/m²	1/h	Tilatyyppi
135 200	310	IVKH	178,2	570,1	62,0	62,0	0,3	0,3	0	0,0	0,022	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
135 200	311	Hissi	3,5	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,014	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
135 200	312	HORMI	1,4	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,014	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	10	HORMI	1,8	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,025	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	11	Hissi	2,9	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,000	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	12	HORMI	2,7	9,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,000	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	13	HORMI	1,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,000	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	14	HORMI	0,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,000	(Sisäilmastoluokitus 2018) Opetustilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.
131 200	201	TK	20,4	73,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1 020	50,0	0,020	(Sisäilmastoluokitus 2018) Neuvottelutilat, oletuslämpökuormat taul. 2.4.

Below the main table, there are two smaller tables. The first one is titled 'Tilan rakenteet' and lists construction details for walls, floors, and roofs. The second one is titled 'Tilan lämpökuormat' and lists energy load details for the same elements.

Kuva 7. RIUSKAn etusivu.

5.2.2 Asetukset ja säätiedot

Asetuksista voidaan valita kieli sekä halutessaan rahayksikön ja ilmajärjestelmän yksikön vaihtaminen on mahdollista. Asetuksien tarjoamasta staattiseen lämpöhäviölaskentaan perustuvien korjauskertoimien sekä lämpimien ja puolilämpimien tilojen lämpötilarajat ovat vaihdettavissa. Säätiedoista (kuva 8) valitaan rakennuksen alueellisen sijainnin mukainen paikkakunta ja ulkolämpötila. Säätietojen vaikutus RIUSKassa tehtävissä laskelmissa on suuri. Paikkakunnan lisäksi tulee rakennus suunnata oikein sekä rakennuksen tyyppi määritetään käyttötarkoituksen mukaisesti. [15]



Kuva 8. Säätiedot ja vuosisään datataulukko, RIUSKA.

5.2.3 Kirjastot ja lämpökuormat

Kuten aikaisemmin on mainittu, yksi RIUSKAn kehittämisen keskeisimmistä tavoitteista oli monipuolisten kirjastojen luominen. Kirjastot toimivat ohjelmistossa tietokantoina, joihin kuuluvat rakenteet, ikkunat, aikataulut, tilatyyppit, kuormat, energiamuodot sekä energiamuotojen kertoimet. Näiden sisältöä pystytään muokkaamaan sekä uusien luominen on mahdollista. Kirjastojen sisältämiä materiaaleja käyttämällä voidaan nopeuttaa työskentelyä huomattavasti, sillä jonkin rakenteen, aikataulun tai tilatyyppin vaihtaminen sekä lisääminen onnistuu monivalintaisesti. [15]

Rakennekirjastossa (kuva 9) on seinät, alapohjat, yläpohjat, välipohjat sekä ovet. Täältä voidaan valita valmiina olevia rakenteita, joille rakenteiden paksuudet, lämmönjohtavuudet ja muut arvot ovat valmiiksi määriteltynä. Vastaavasti kirjastoon voidaan myös luoda uusia rakenteita, jolloin niiden lämmönläpäisykerroin vastaa syöttämiäsi tietoja. [15]

Laskentaprojektin rakennekirjasto

U = 1 / (R_{in} + IR + R_{out})

U-arvoja laskettaessa käytetyt pintavastukset [(m²·K)/W]:

- Ulkopuolinen pintavastus: 0,04
- Sisäpuolinen pintavastus, vaakasuora lämpövirta: 0,13
- Sisäpuolinen pintavastus, pystysuora lämpövirta ylös: 0,10
- Sisäpuolinen pintavastus, pystysuora lämpövirta alas: 0,17

Rakenteet:

Tyyppi	Tunnus	Nimi	U-arvo W/(m ² ·K)	U-lämpöhäviö W/(m ² ·K)	Paino kg/m ²	Absorptio 1...99	Karkeus 1..6	Inv. kust. EUR/m ²	Muut kust. kpl
Ulkoiseinä	US 01	Betonisandwich	0,17	0,17	364	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 02	Ohutrapattu tiiliseinä	0,24	0,24	210	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 03	Ohutrapattu teräsrunkoseinä	0,20	0,20	43	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 04	Ohutrapattu betoniseinä	0,23	0,23	392	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 05	Ohutrapattu kevytsoraharkkoseinä	0,22	0,22	193	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 06	Betonisandwich	0,21	0,21	364	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 07	Tiiliverhoiltu betoniseinä	0,24	0,24	240	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 08	Kevytsoraharkkoseinä	0,25	0,25	520	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 09	Tiiliverhoiltu elementtiseinä	0,21	0,21	200	70	3	0,00	0
Ulkoiseinä	US 10	Lautaverhoiltu seinärakenne	0,24	0,24	19	70	3	0,00	0

Rakenteen materiaalikierrokset järjestyksessä "sisältä ulospäin":

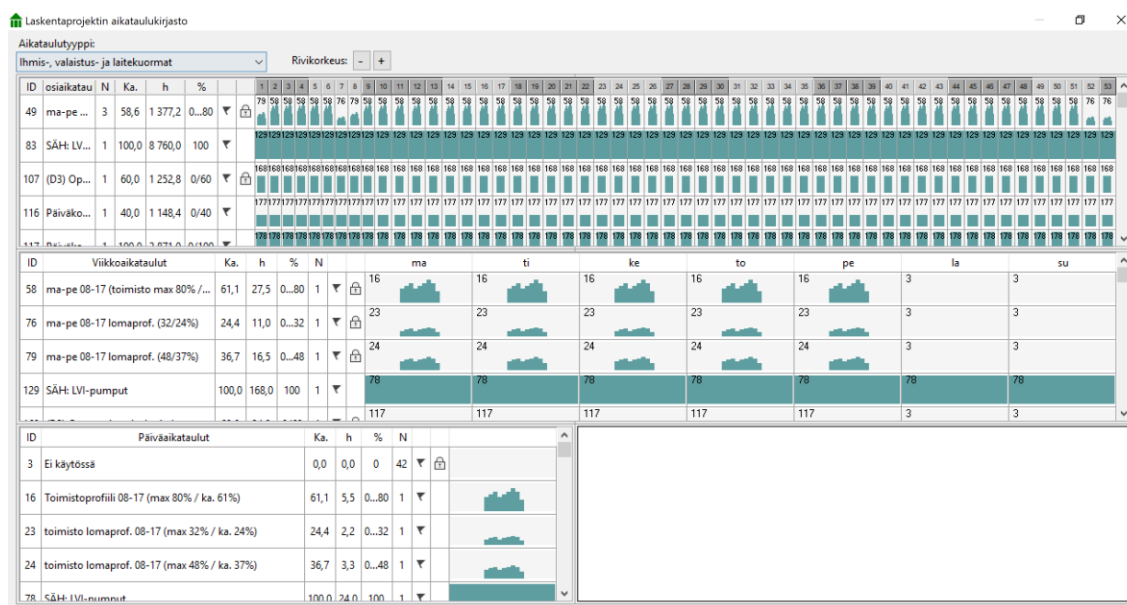
Nimi	Aikavakio h	Vastus (m ² ·K)/W	Paksuus mm	Lämmön- johtavuus W/(m·K)	Lämpö- kapasiteetti J/(K·kg)	Tiheys kg/m ³
Tiili (reikä)	15,9	0,36	135,0	0,380	900	1 325
Mineraalivilla 1	2,5	2,93	120,0	0,041	840	30
Tuulensuojalevy	0,9	0,75	30,0	0,040	1 210	120
Rappaus	0,1	0,02	15,0	1,000	840	1 600

Materiaalit:

Nimi	Vastus (m ² ·K)/W	Lämmön- johtavuus W/(m·K)	Lämpö- kapasiteetti J/(K·kg)	Tiheys kg/m ³
Betoni 1		1,700	840	2 500
Betoni 2		1,700	920	2 400
Betoni 3		1,700	840	2 400
Betoni, väliseinä		1,700	718	2 050
Bitumi		0,160	1 700	1 300
Graniitti		2,900	890	2 750
Ilmaväli (10 mm)	0,15			
Ilmaväli (20 mm)	0,17			
Ilmaväli (20 mm)_2	0,17			
Ilmaväli (5 mm)	0,11			
Ilmaväli (50-100 mm)	0,18			
Kevytsorabetoni		0,170	1 000	600

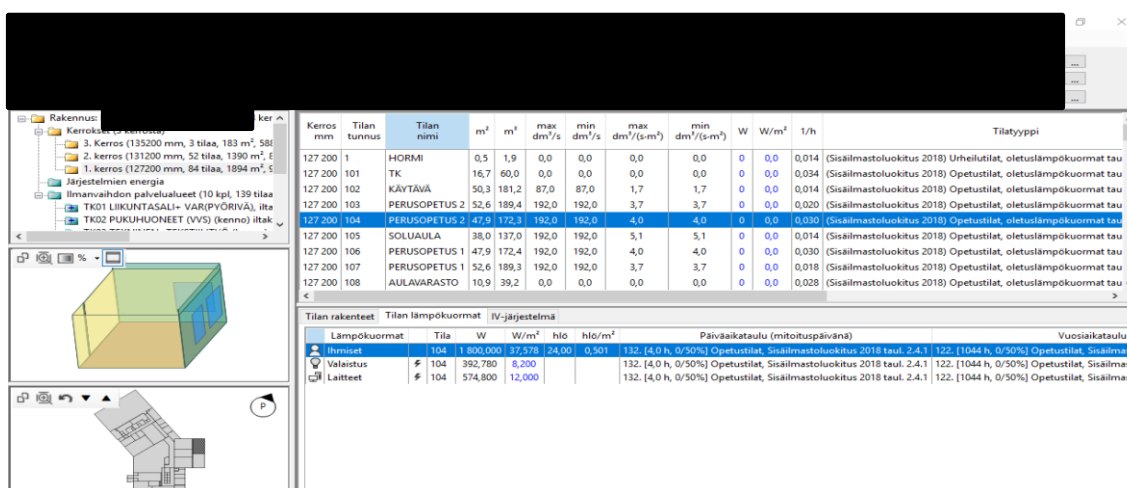
Kuva 9. Rakennekirjasto, RIUSKA.

Energialaskelmiin vaikuttavat aikataulut (kuva 10) on tehty monipuolisiksi. Saatavilla on päiväaikatauluja, viikkoaikatauluja sekä vuosiaikatauluja. Niiden muokkaaminen ja kokonaan uusien aikataulujen lisääminen on mahdollista. Ihmisistä, laitteista ja valaistuksista syntyville kuormille tulee asettaa aikataulut, jotka vastaavat kohteen käyttöaikatauluja. Rakennuksessa sijaitsevaa toimintaa voidaan tarkastella näiden energiankulutukseen liittyvien tietojen pohjalta. [15]

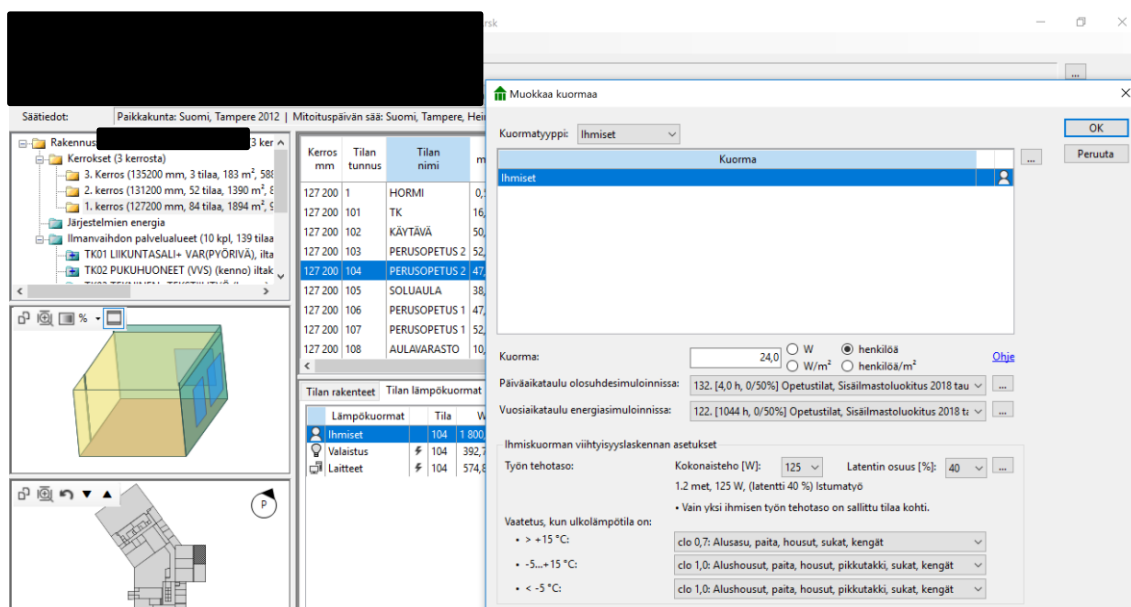


Kuva 10. Aikataulukirjasto, RIUSKA.

Lämpökuormia syntyy tilassa olevista ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta. Jokaiselle tilalle tulee määrittää tilatyyppi sekä sen käyttöä vastaavat kuormat. Tietoja saadaan esimerkiksi huonekortista, ja mikäli ei ole saatavilla ihmisten lukumäärää, voidaan arkkitehtipohjista laskea tilaan varattujen penkkien mukaan arvioitu ihmismäärä. Nämä kuormat tulee määrittellä niin, että ne vastaavat mahdollisimman todennäköistä tilannetta. Aikaisemmin mainitut aikataulut tulee asettaa näille lämpökuormille. Kuormia voidaan muokata tai vaihtoehtoisesti luoda uusia. (kuvat 11 ja 12.) [15]



Kuva 11. Tilan lämpökuorma. Ylhäällä sinisellä maalattu alue on aktiiviseksi valittu tila, kun taas alemmassa on kyseisen tilan lämpökuormia, joista valittuna ihmiskuormat. RIUSKA.



Kuva 12. Valitun lämpökuorman muokkausvalikko, RIUSKA.

5.2.4 Järjestelmät

Kuvan 13 vasemmalla, palkissa olevassa "Järjestelmien energia" -kohdassa luetellaan rakennuksen energiakulutuksen tiedot. Näiden sisältöä, kuten lämmitysenergiaa voidaan muokata vastaamaan kohteen tietoja, tästä esimerkkinä kuva 14. Laskelmista voidaan myös jättää pois jokin osa-alue, mikäli sitä ei haluta huomioida ja vaihtoehtoisesti voidaan lisätä ulkopuolisia kuormia. Maalämpösuunnittelun kannalta käyttöveden kulutusta koskevat asetukset tulee määrittää huolellisesti. [15]

Saattiedot: Paikkakunta: Suomi, Tampere 2012 | Mitoituspäivän saa: Suomi, Tampere, Heinäkuu

Rakennus: [redacted]

Kerrokset (3 kerrosta)

- 3. Kerros (135200 mm, 3 tilaa, 183 m²)
- 2. kerros (131200 mm, 52 tilaa, 1390 m²)
- 1. kerros (127200 mm, 84 tilaa, 1894 m²)

Järjestelmien energia

- Ilmanvaihdon palvelualueet (10 kpl, 139 m²)
- TK01 LIIKUNTASALI+ VAR(PYÖRIVÄ)
- TK02 PUKUHUONEET (VVS) (kenno)
- TK03 TEKNIINEN+ TEKSTIILITYÖ (kenno)

Energiasimuloinnissa käytettävät laajuustiedot:

Geometriamallin pinta-ala: 3 467,4 m²
Geometriamallin tilavuus: 18 570,0 m³

	MWh	kWh/m²	kWh/m³	1000 kg CO₂	E-luku MWh	E-luku kWh/m²
Ostoenergia:						
• Lämmitysenergia:	66,0	19,0	3,6	14,5	33,0	9,5
• Jäähdytysenergia:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
• Sähköenergia:	396,3	114,3	21,3	88,4	475,6	137,2
• Lämmityssähkö:	103,9	30,0	5,6			
• Jäähdytys sähkö:	32,4	9,3	1,7			
• LVI, muu sähkö:	136,4	39,3	7,3			
• Valaistussähkö:	29,2	8,4	1,6			
• Laitesähkö:	94,5	27,2	5,1			
Uusiutuva omavaraisenergia:	258,9	74,7	13,9			
Ilmaisenergia, muu:						
Ilmaisenergioiden ylijäämät:						
Lämmitysenergian tarve:	426,8	123,1	23,0			
✓ Simuloitu, IV-kone:	165,3	47,7	8,9			
• Häviöenergia:	0,0	0,0	0,0			
✓ Simuloitu, tilalaitteet:	129,7	37,4	7,0			
• Häviöenergia:	26,6	7,7	1,4			
✓ Lämmin käyttövesi:	38,1	11,0	2,1			
• Häviöenergia:	67,1	19,4	3,6			
✓ Muu:	0,0	0,0	0,0			
Jäähdytysenergian tarve:	81,0	23,4	4,4			
✓ Simuloitu, IV-kone:	46,9	13,5	2,5			
• Häviöenergia:	28,2	8,1	1,5			
✓ Simuloitu, tilalaitteet:	5,9	1,7	0,3			
• Häviöenergia:	0,0	0,0	0,0			
✓ Muu:	0,0	0,0	0,0			

Kuva 13. Järjestelmien energiat, RIUSKA.

Energiamuotojen osuudet: Lämmitys

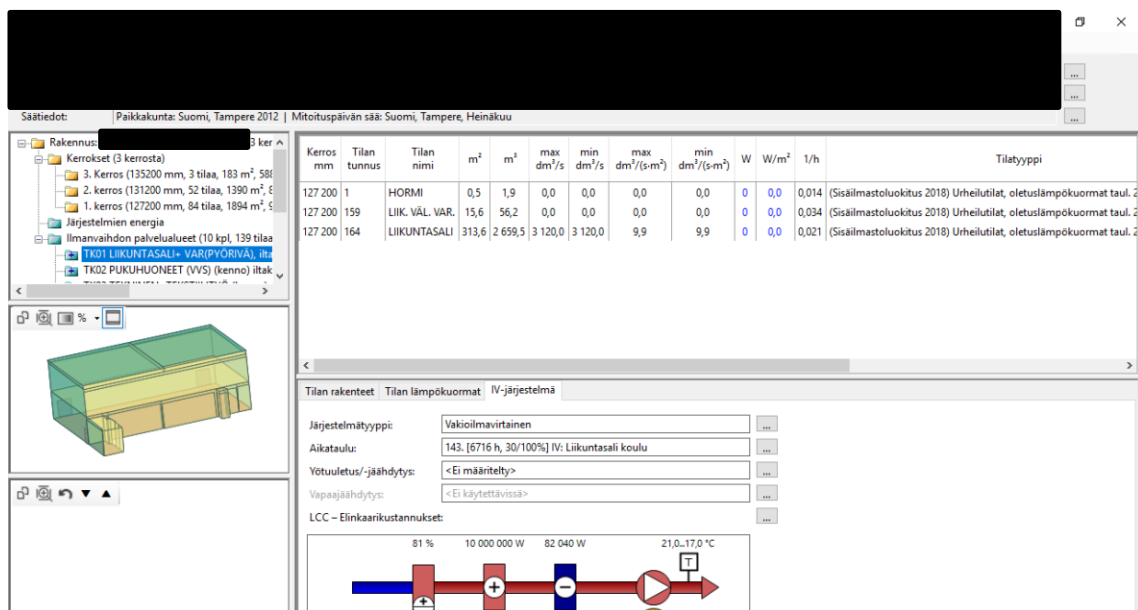
Energiamuodon nimi	Energiamuodon tyyppi	Energiamuoto-kerroin	Vuosi-hyötysuhde	Arvo	IV 100,00 %	Tila 100,00 %	LKV 100,00 %	Muu 100,00 %	
Aurinkolämpö	Ilmaisenergia, aurinkolämpö	0,00	1,00						Tyhjennä
Fossilinen	Fossilinen	1,00	1,00						Tyhjennä
Ilmaisenergia, muu	Ilmaisenergia, muu	0,00	1,00						Tyhjennä
Kaukolämpö	Kaukolämpö	0,50	0,97	Suhteellinen arvo	15,00	15,00	15,00	15,00	Tyhjennä
Lämmitys sähkö	§ Sähkö	1,20	1,00						Tyhjennä
Lämpöpumppu, käyttövesi (esim. Gebwell Taurus 90)	§ Lämpöpumppu	1,20	2,80	Suhteellinen arvo			85,00		Tyhjennä
Lämpöpumppu, lämmitys (esi. Gebwell Taurus90)	§ Lämpöpumppu	1,20	3,80	Suhteellinen arvo	85,00	85,00		85,00	Tyhjennä
Uusiutuva	Uusiutuva	0,50	1,00						Tyhjennä

Kuva 14. Lämmitysenergioiden muokkaus, RIUSKA.

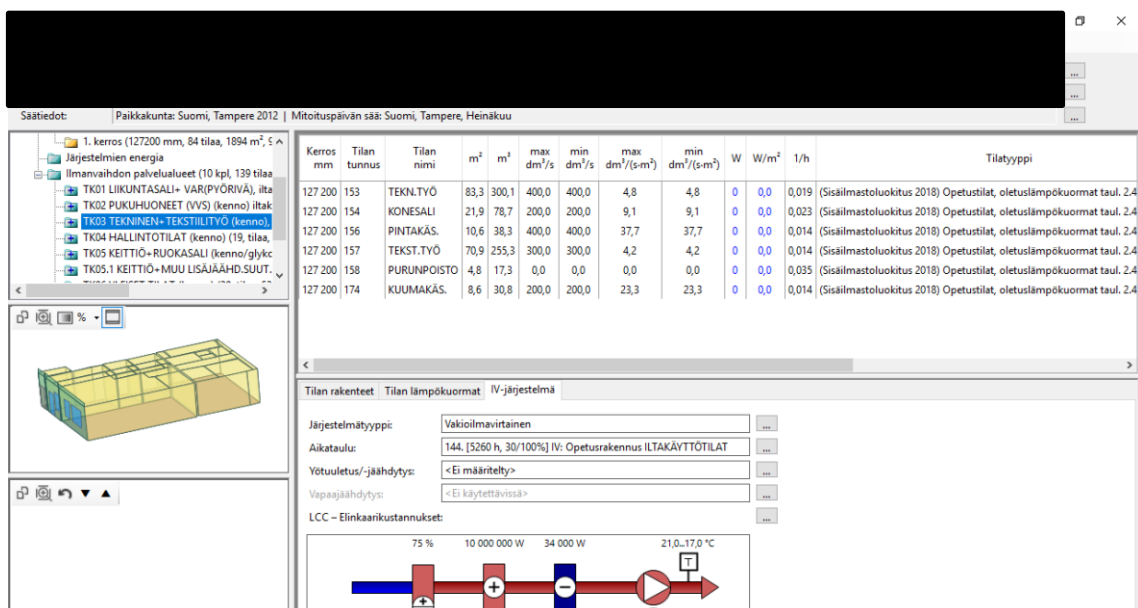
5.2.5 Ilmanvaihtokoneet sekä palvelualueet

Ilmanvaihtokoneiden tietoihin (kuva 15) valitaan järjestelmän tyyppi ja määritellään ilmanvaihtokoneen aikataulu. Koneen osia sekä sen tietoja, kuten lämmöntalteenoton asetuksia voidaan muokata. Ilmanvaihtokoneiden alle valitaan tämän palvelualueeseen kuuluvat tilat, jollei niitä ole aikaisemmassa vaiheessa vielä määritetty. Jokaisen rakennuksessa olevan tilan tulee kuulua johonkin ilmanvaihdon palvelualueeseen. Palvelualueita (kuva 16) voidaan lisätä tai poistaa sekä tiloja voidaan siirrellä palvelualueesta toi-

seen. Lisäksi jokaiselle rakennukseen kuuluvalla tilalla tulee erikseen määrittää ilmanvaihtosuunnittelijan antama ilmavirta tai vaihtoehtoisesti määrittää tilatyypin mukainen ilmavirta pinta-alaan suhteutettuna. [15]



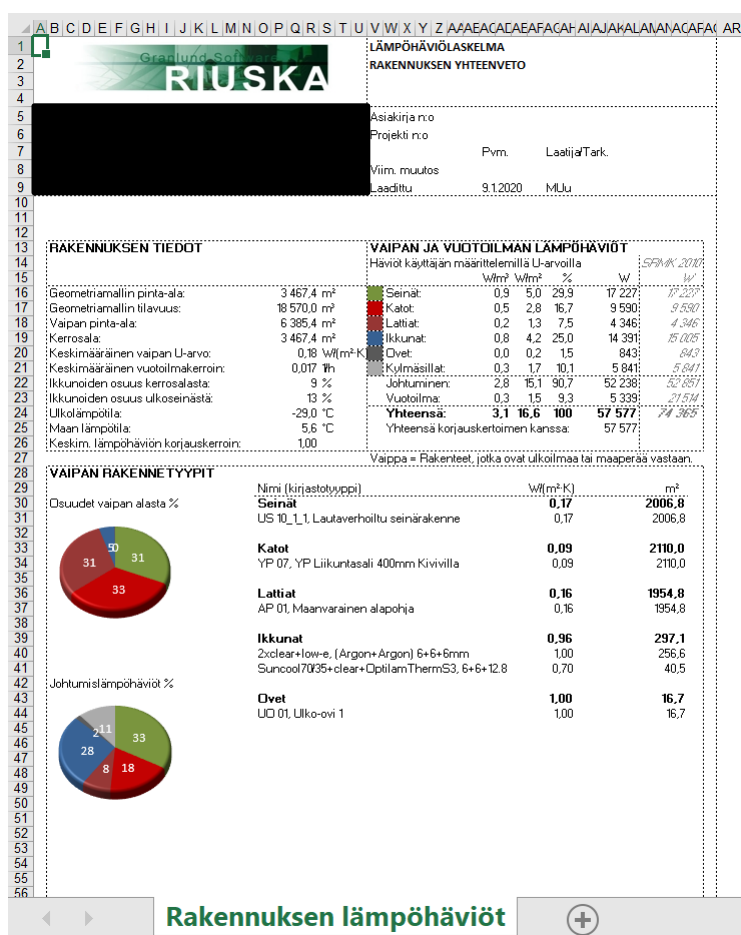
Kuva 15. Ilmanvaihtokoneen asetukset, RIUSKA.



Kuva 16. Ilmanvaihdon palvelualueet. Vasemmalla sinisellä valittuna aktiiviseksi palvelualue, johon kuuluvat tilat ovat lueteltuina oikealla puolella. Alempana kyseistä palvelualueutta palvelevan ilmanvaihtokoneen asetuksia. RIUSKA.

5.2.6 Simulointien ja laskelmien tulokset

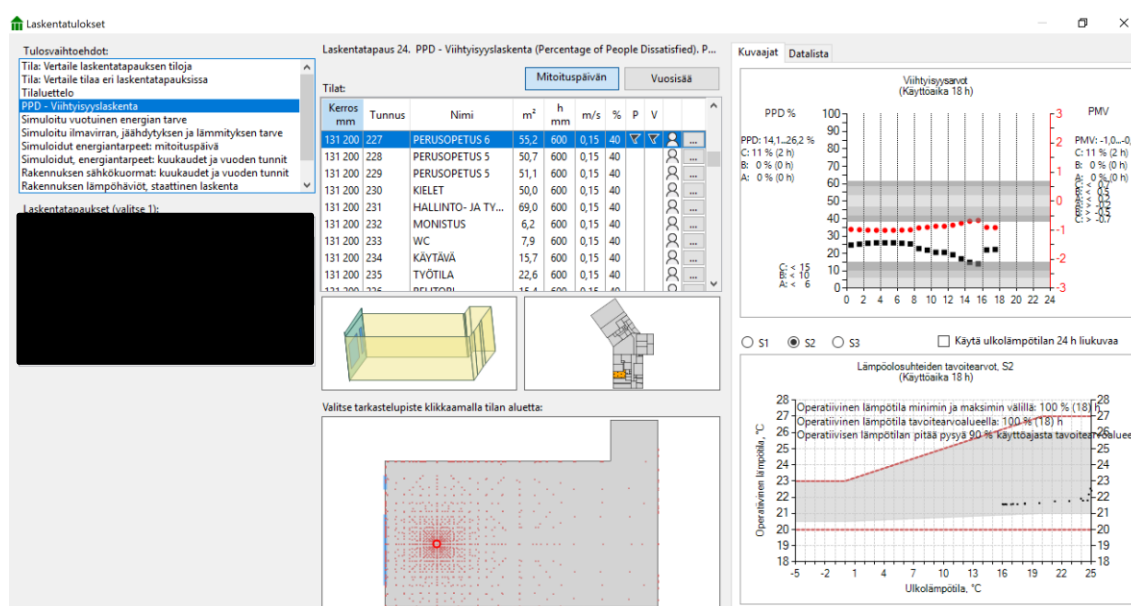
Lämpöhäviöiden laskenta tapahtuu automaattisesti, kun ohjelma laskee rakennuksesta tai yksittäisestä tilasta ulkoilmaan siirtyvän lämpöenergian. Vuotoilmakerroin tulee tarkastaa, sillä se vaikuttaa lämpöhäviöihin. RIUSKAn tekemät lämpöhäviöt perustuvat sisäilman sekä ulkoilman väliseen eroon ja rakenteille asetettuihin u-arvoihin sekä kylmäsiltoihin. Lämpöhäviöistä muodostuvaa kokonaiskuvaa voidaan tarkastella "Tulokset"-välilehdeltä, josta saadaan luotua excel-tiedosto (kuva 17). Täällä nähdään lämpöhäviöihin vaikuttavat tiedot sekä esimerkiksi seinien osuus rakennuksen kokonaislämpöhäviöistä. [15]



Kuva 17. Rakennuksen lämpöhäviöiden tuloksia, RIUSKA.

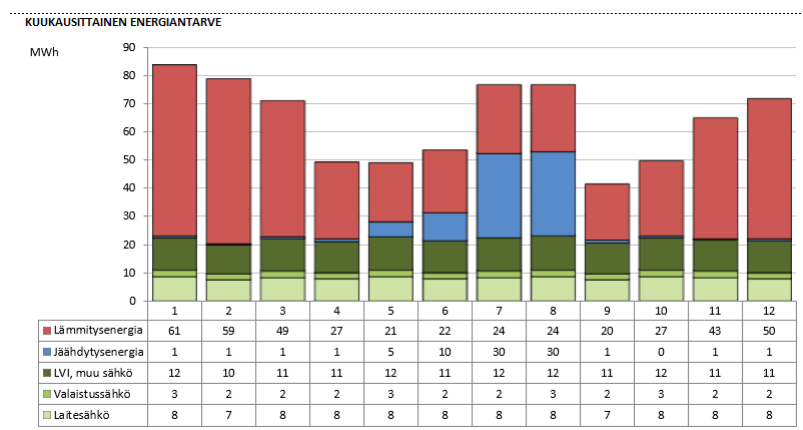
Tilojen olosuhdesimuloinneissa RIUSKA käyttää laskennan pohjana päivittäistä säätietoa. Simulointien suorittaja pystyy itse määrittämään tilalle suunnitellun ilmamäärän sekä

halutun lämpötilan tai vaihtoehtoisesti ohjelma kertoo sen käyttäjälle, mitä tapahtuu lämpötilalle tietyllä ilmamäärällä tai jäähdytyksellä. Tilojen olosuhteisiin vaikuttavat myös siihen suunnitellut lämpökuormat, joita syntyy ihmisistä, valaistuksesta sekä laitteista. Olosuhdesimuloinnit ovat kätevä työkalu tarkastelemaan tilan olosuhteita eri materiaaleilla, ilmamäärillä sekä kuormilla. Tämän yhteydessä voi halutessaan valita olosuhdesimuloinnin yhteyteen viihtyvyyslaskennan. Viihtyvyyslaskennan (kuva 18) avulla tilaan suunniteltujen henkilöiden olosuhteita tarkastellaan ja voidaan päätellä tilan viihtyvyystaso. Tuloksista nähdään, ovatko tilan ratkaisut käyttötarkoitukseen soveltuvia. [15]



Kuva 18. Viihtyvyyslaskennan tulokset, RIUSKA.

Energiasimuloinnit laskevat lämmön, jäähdytyksen sekä ilmanvaihtoon määriteltujen koneiden vuosittaisen energiankulutuksen. Lämmitys- ja jäähdytystarpeet ohjelma laskee tuntikohtaisen säätiedon mukaisesti, mihin vaikuttaa rakennuksen alueellinen sijainti. Energiasimulointien tuloksiin (kuvat 19, 20 ja 21) vaikuttavat myös vaihtoehtoiset energiankulutukset, joita voidaan muokata tarpeen mukaisesti. Tuloksista saatava energiankulutusta kuvaava kokonaisuus kertoo myös kuukausittaisen energiankulutuksen. [15]



Kuva 21. Energioiden simulointitulokset, kuukausittainen energiantarve. RIUSKA.

Kun laskelmat ja simuloinnit on tehty, maalämpösuunnittelun kannalta olennaista tietoa on rakennuksen energiankulutuksen tuntikohtainen laskenta. RIUSKasta saadaan koko vuoden energiankulutusta koskeva excel-tiedosto. Tuntikohtaista laskentaa avataan tarkemmin luvussa 6.2 Lähtötiedot.

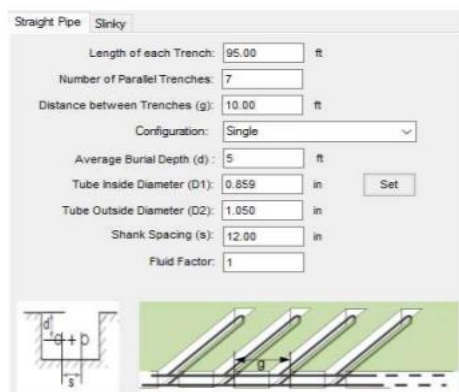
5.3 GLHEPro

GLHEPro on energiakaivokentän mitoitukseen sekä simuloimiseen tarkoitettu ohjelmisto. Energiakaivokentän mitoittamiseen ja simuloimiseen tarvitaan rakennuksen tehotarve, jonka avulla määritellään lämpöpumppu. Tämän valitun pumpun COP:n eli sen hyötysuhteen avulla saadaan määritettyä maasta otettavat energiat ja näitä tietoja hyödyntämällä voidaan simuloida ja mitoittaa energiakaivokenttä. Ohjelmistolla saadaan selville lämpöpumpulle tulevan lämmönkeruunesteen kuukausittainen keskilämpötila ja huippulämpötilat. Huippulämpötilalla tarkoitetaan lämmönkeruunesteen keskimääräistä maksimi- ja minimilämpötilaa maalämpöpumpulle mentäessä ja maalämpöpumpulta lähdettäessä. Lisäksi ohjelmalla saadaan lämpöpumpun kuukausittainen sähkönkulutus ja maasta haettavan energian määrä muodossa W/m. Ohjelmistoa käytetään pääasiassa selvittämään, että energiakaivokenttä ei jäädy pitkällä aikavälillä. GLHEProlla pystytään simuloimassa huomioimaan kaivokentästä otettu vapaajäähdytys tai lämpöpumpun tuottaman konejäähdytys. Työssä tehdyt simuloinnin eri vaiheet on kuvattu tarkemmin osiossa 6.3 Simuloinnit. [16; 17.]

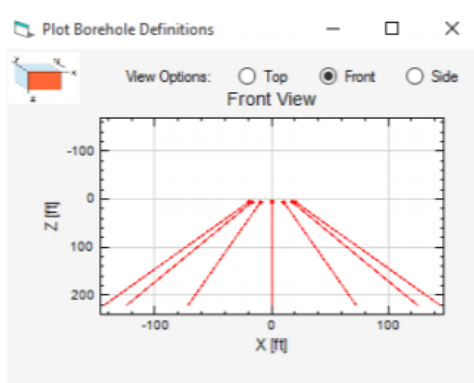
	Simulation (GLHESim)	Hourly Simulation (GLHESimHourly)	Sizing (GLHESize)	Hybrid Sizing (Hybrid GLHESize)
Vertical/Inclined				
Single U-tube	x	x	x	x
Double U-tube	x	x	x	x
Concentric	x	x	x	x
Standing Column Well	*	x		
Horizontal				
Straight	x		x	x
Slinky™	x		x	
* Average Monthly Loads can be used in the Hourly Simulation				

Kuva 22. GLHEPron simulointi- ja mitoitusvaihtoehtoja [18].

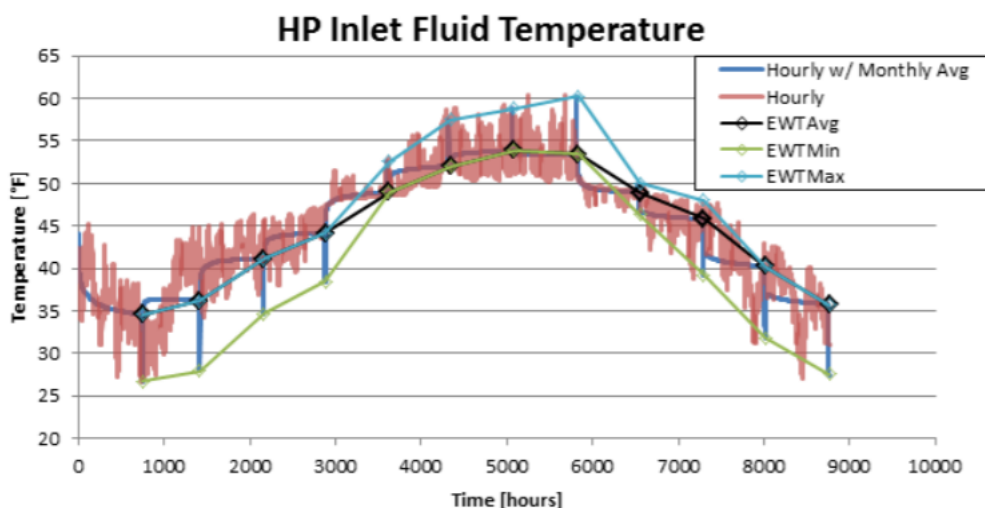
Ohjelmiston uusimman päivityksen mukana tulleet ominaisuudet ovat hyödyllisiä (kuva 22). Käyttäjä pystyy luomaan omia, jopa 30 energiakaivon asetelmia. Käyttäjä voi halutessaan sijoittaa energiakaivot epäsäännöllisesti haluamaansa paikkaan, tehdä viistoitaisia (kuva 24) muodostelmia, määritellä energiakaivoja eri syvyyksillä tai vaakatasoon porattuja energiakaivoja. Näiden lisäksi käyttäjä pystyy simuloimaan ja suunnittelemaan kaksi- tai neliputkisia lämmönsiirtimiä (kuva 23). Tuntikohtaisen simuloinnin tekeminen on mahdollista kaikilla vaaka- ja pystykaivoilla, jonka pituuden määrittää toimitettavien tuntikohtaisten kuormien määrä. Kuvan 25 avulla nähdään kuukausittaisen ja tuntikohtaisen simuloinnin eroavaisuus lämpöpumpulle tulevan nesteen lämpötilassa. Lisäksi uusimmassa versiossa on yli 4 000 paikkakunnalle luotu lämpötilaprofiili. [18]



Kuva 23. Suora, vaakatasossa oleva kaksiputkinen lämmönsiirrin [18].



Kuva 24. Viistoittain ulospäin, 30 asteen kulmaan asennettuja energiakaivoja. Etunäkymä [18].



Kuva 25. Kuukausittaisen ja tuntikohtaisen lämpöpumpulle tulevan nesteen lämpötilasimulointi [18].

6 Hybridilämmitys- ja jäähdytystuottojärjestelmän suunnittelu

Kohteen maalämmön jäähdytyspuolen sekä kaukolämmön suunnittelun ja mitoituksen suorittaa yhteistyönä Granlundin kanssa toinen yritys, joten niiden osista ja toiminnasta ei kytKentäkaaviossa sekä toimintaselosteessa mainita. Tämä vaikuttaa myös hieman

toimintaselostuksessa kuvailtujen lämmitysverkostojen toiminnan selostamiseen, koska positiomerkein kirjoittaminen hankaloittaa lukemista ilman siihen tarvittavaa kytkentäkaaviota.

6.1 Maalämpöjärjestelmän mitoitus

Maalämpöjärjestelmän suunnittelun vaiheista maalämpöpumpun mitoitus ja valinta on yksi tärkeimmistä. Myös oikein mitoitettu energiakaivokenttä on tärkeä vaihe maalämpöjärjestelmän suunnittelussa, sillä se vaikuttaa lämmönkeruunesteen lämpötiloihin ja lämpöpumpun höyrystyslämpötilaan, joka on yhteydessä lämpöpumpun lämpökertoimeen eli hyötysuhteeseen. Rakennuksen lämmönjakojärjestelmä, verkostojen menoveden lämpötilat, lämmitysteho sekä lämmitysenergiantarve ovat suuressa roolissa maalämpöpumppujärjestelmää mitoittaessa. Lämpöpumppulaitoksen vuosihyötysuhde eli SCOP määrittää lämmityskustannuksissa saavutettavat säästöt. Yksi tärkeimmistä maalämpöpumpun hyötysuhteeseen vaikuttavista tekijöistä on lämmönkeruunesteen lämpötila, johon vaikuttaa energiakaivokentän mitoitus eli kentän geometria, kaivojen syvyys ja lukumäärä sekä maan energiatase. [8]

Rakennuksen energiantarve on yksi maalämpöjärjestelmään kuuluvan lämmönkeruupiirin tärkeimpiä lähtötietoja. Energiantarve selvitetään rakennuksen tietojen perusteella, johon vaikuttavat rakennuksen tilavuus, maantieteellinen sijainti, vaipan eristystaso, käyttöveden tarve, muut lämmönlähteet sekä ilmanvaihto. Pohjavesiolosuhteilla, maa- ja kallioperän olosuhteilla sekä lämmönjakojärjestelmän lämpötilalla on vaikutusta keruupiirin mitoitukseen sekä pituuteen. [4]

Rakennuksen energialaskelman jälkeen valitaan kohteeseen sopiva maalämpöpumppu. Tarvittaessa voidaan valita useampikin maalämpöpumppu, sillä rakennuksen lämmitys ja lämpimän käyttöveden lämmitys voidaan tehdä erillisillä maalämpöpumpuilla. Lämpöpumpun valinnan lisäksi maalämpöjärjestelmään kuuluvat osat, kuten putkistot, varaajat, venttiilit, pumput ja lämmönsiirtimet on mitoitettava. Energiakaivokentän mitoituksessa on otettava huomioon energiakaivojen etäisyydet, syvyydet ja määrä. Keruuputkiston suunnittelussa ja putkiston painehäviölaskelmissa sekä virtaamatarkasteluissa pitää huomioida siirtoputkisto ja jakotukit. [4]

Energiakaivokentän kaivojen syvyyttä, määrää ja sijoittelua voidaan optimoida simulointityökalujen avulla. Tähän kehitettyjen tietokoneohjelmien avulla mallinnetaan energia-kenttä ja simuloidaan lämmönkeruunesteiden toimintaa ja kehitystä, jopa useita kymmeniä vuosia eteenpäin. Ohjelmistojen käyttöä varten tulee laatia rakennuksen energioista tuntikohtaista sekä kuukausikohtaista laskentaa. Energia- ja tehotiedot, maa- ja kallioperän lämmönjohtavuus sekä maalämpöjärjestelmään valitulla lämpöpumpulla saavutettava lämpökerroin ovat suurimpia simulointitulokseen vaikuttavia tekijöitä. [4]

6.2 Lähtötiedot

Energiakaivokentän ja lämpöpumpun lähtötietoina toimivat RIUSKasta saadut energia- ja tehotiedot. Saatujen tuntikohtaisten energialaskelmien tulkitseminen on tärkeää, jottei järjestelmää yli- tai alimitoiteta virheellisten kokonaisenergiamäärien takia. Rakennuksen sijaintiin tulee myös kiinnittää huomiota, sillä maa- ja kallioperien ominaisuudet, kuten kallioperän lämmönjohtavuus, irtomaakerroksen paksuus ja maaperän pintalämpötila, vaihtelevat alueittain, joten myös lämmönjohtavuuksissa on eroja.

RIUSKasta tuntikohtaiset energialaskelmat saadaan excel-tiedostona (kuva 26). Kiinteistön kokonaislämmitysenergian kulutus tunneittain saadaan summaamalla tuntikohtaiset lämpimän käyttöveden lämmitys, tilojen lämmitys ja IV-lämmitys. Laskennan summaksi saatiin 429 MWh, josta osuudet jakaantuvat seuraavasti: "Lämmitys IV-kone" 165 MWh, "Lämmitys tilat" 159 MWh sekä "Lämmitys käyttövesi" 105 MWh. [17]

Koska RIUSKAN laskelmista ei käyttöveden lämmittämiseen kulutettavalle energialle ole valmista tuntipohjaista kulutustietoa, pitää se luoda. Projektin kohteen käyttöveteen kulutettavaksi energiaksi saatiin RIUSKAN tuloksista 105 MWh. Tämän tiedon pohjalta täyttyy luoda käyttöveden kulutusprofiili (kuva 27) vuoden jokaiselle tunnille. Kulutusprofiilit vaihtelevat kohteittain, sillä eri rakennustyypeillä, esimerkiksi koulu- ja asuinkiinteistöissä, on poikkeavat käyttöveden kulutusprofiilit, jotka eroavat toisistaan merkittävästi. [17]

29), joka lasketaan jakamalla lämpöpumpun tuottama energia kiinteistön kokonaislämmöntarpeella, vuotuisella tasolla. Tarvittavia kaavoja avataan hieman alla olevassa kappaleessa. Energianpeittoasteeksi pyritään saamaan vähintään 90 % riippuen kohteen lisälämmönlähteestä. [17]

Lisälämmönlähde on kohdekohtainen, jonka valintaan vaikuttavat esimerkiksi tilaajan asettamat vaatimukset. Sähkökattila on useimmissa tapauksissa kustannustehokkaampi vaihtoehto, mutta tulee kannattavuus selvittää elinkaarikustannuslaskennalla. Valittaessa sähkökattila, joudutaan välillä kasvattamaan pääliittymän sulakekokoa merkittävästi, jolloin kustannukset nousevat ja kannattavuus heikkenee. Suurissa kohteissa kaukolämmön valinta voi olla kannattava, sillä kaukolämmön perusmaksujen osuus kokonaisenergiainnoista jää suhteessa pienemmäksi; ne myös vaihtelevat kaupunkikohtaisesti. [17]

Vuotuinen kiinteistön lämmitysenergiantarve tuodaan kuvan 28 mukaiseen taulukkoon. Laskelmia lähdettiin viemään eteenpäin valitsemalla lämpöpumpuksi Gebwellin Taurus 90S, jonka teknisistä tiedoista nähdään lämmitysteho. Lämmitystehon ollessa 88 kW lasketaan ne tunnit, jolloin lämpöpumppu tuottaa nimellistehonsa mukaisesti energiaa eli lämpöpumpun tuoton osuus kokonaislämmöntuotosta. Tulee myös selvittää, paljonko rakennuksen kuluttamasta energiasta jää tuottamatta, mikäli lämmitystarve on yli 88 kW. Viimeisenä lasketaan lämpöpumpun kuluttaman ostoenergian osuus lämpöpumpulla tuotetusta energiasta. [17]

Vuoden tunti	Kiinteistön lämmitysenergian tarve	Lämpöpumpun tuotto	Ostoenergian tarve	Lämpöpumpun ostoenergia
	Wh	Wh	Wh	Wh
1	30584	30584	0	10195
2	32570	32570	0	10857
3	53546	53546	0	17849
4	36665	36665	0	12222
5	38288	38288	0	12763
6	97464	88000	9464	29333
7	108305	88000	20305	29333
8	149675	88000	61675	29333
9	121867	88000	33867	29333
10	119673	88000	31673	29333
11	118789	88000	30789	29333
12	121858	88000	33858	29333
13	98706	88000	10706	29333
14	92046	88000	4046	29333
15	87031	87031	0	29010
16	82981	82981	0	27660
17	113461	88000	25461	29333
18	92421	88000	4421	29333
19	92741	88000	4741	29333
20	95867	88000	7867	29333
21	90371	88000	2371	29333

Kuva 28. Lasketun tuntikohtaisen datan syöttäminen. Granlund Oy.

Lämpöpumpun maksimiteho	88	kW
Lämpöpumpulla tuotettu energia	387	MWh
Kulutettu sähkö, ostoenergian määrä	129	MWh
Lämpöpumpun vuosihyötysuhde	3	
Lämpöpumpun kokonaiskulutus	429	MWh
Lämpöpumpun energianpeittoaste	90	%

Kuva 29. Energianpeittoaste valitulla lämpöpumpulla. Granlund Oy.

Kuten kuvasta 29 nähdään, valitulla lämpöpumpulla ja suoritetuilla laskuilla saadaan energianpeittoasteeksi 90 %. Kohteessa kokeiltiin kyseisiä laskuja myös Gebwellin Gemini 64 -nimisen lämpöpumpun tehotiedoilla, joita olisi tullut kaksi kappaletta ja energianpeittoasteeksi olisi tullut 94 %. Kohteeseen tulevan kaukolämmön takia päädyttiin silti yhteen Taurus 90S -malliin ja hyväksyttiin tämä 90 % energianpeittoasteeksi.

Tuntikohtainen kiinteistön lämmitysenergian tarve viedään uudelle välilehdelle, jossa lasketaan sama lämpöpumpun tuotto, kuten aikaisemminkin. Tässä se tulee vain muuttaa

kilowateiksi, jotta laskenta voidaan viedä GLHEPron apulaskentatyökaluun "Peak Load Analysis Tool" (kuva 30), jossa se syötetään kohtaan "Heating delivered".

"Launch Input Form" -nappia painamalla aukeavat (kuva 31) kohdat, johon syötetään tuntipohjainen arvio huippukäytön ajasta. Tällä siis selvitetään, kuinka kauan lämpöpumppu käy enimmillään yhtäjaksoisesti. Näiden arvioiden tarkoituksena on saada kuvan 32 yksi värikkäistä viivoista nousemaan kohtaan 1,000. Kun joku kuvaajista osuu kohdalle 1,000, tämä tarkoittaa, että lämpöpumpun pisin käyntiaika vastaa kohteen energiankulutushuippua. Tässä työssä se oli vihreä, ja sen tuntimäärä 17 otetaan talteen. Kuvassa 33 olevaa "Get Summary Data" -nappia painamalla työkalu laskee automaattisesti kuukausittain maasta haettavan energian määrän. Lähtötiedot kopioidaan ja viedään GLHEProhon. [17]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Date/Time	Heating delivered	Cooling delivered											
2		kW	kW		Location									
3	1.1.2002 1:00	30.58405	0		Sioux Falls, SD									
4	1.1.2002 2:00	32.56995	0											
5	1.1.2002 3:00	53.54584	0											
6	1.1.2002 4:00	36.66487	0											
7	1.1.2002 5:00	38.28751	0											
8	1.1.2002 6:00	88	0											
9	1.1.2002 7:00	88	0											
10	1.1.2002 8:00	88	0											
11	1.1.2002 9:00	88	0											
12	1.1.2002 10:00	88	0											
13	1.1.2002 11:00	88	0											
14	1.1.2002 12:00	88	0											
15	1.1.2002 13:00	88	0											
16	1.1.2002 14:00	88	0											
17	1.1.2002 15:00	87.03129	0											
18	1.1.2002 16:00	82.98096	0											
19	1.1.2002 17:00	88	0											
20	1.1.2002 18:00	88	0											
21	1.1.2002 19:00	88	0											
22	1.1.2002 20:00	88	0											
23	1.1.2002 21:00	88	0											

Kuva 30. Aputyökalu, johon lämpöpumpun huipun käyttöaika tuodaan. GLHEPro.

Control Sheet - Primary Parameters

Input the primary system parameters on this sheet. To enter hourly loads, Cancel this form and paste loads into column B of the Main Sheet.

<u>Heating Peak Durations</u>		<u>Cooling Peak Durations</u>	
#1:	15	#1:	2
#2:	16	#2:	1
#3:	17	#3:	5

Peak Load Method

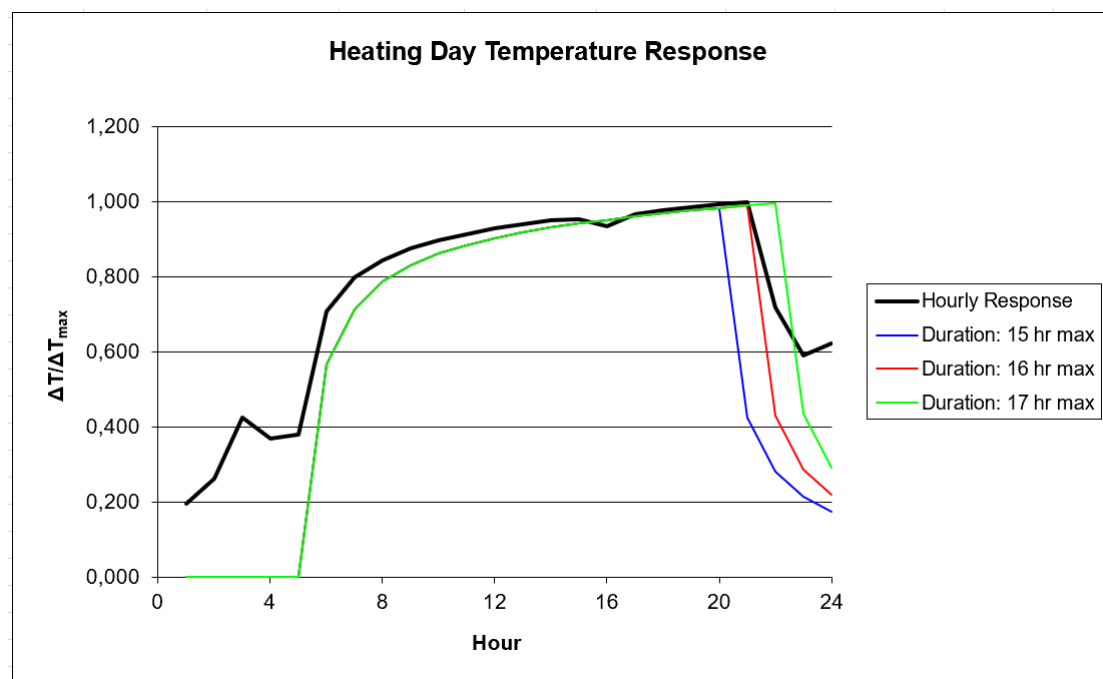
☐ Average over duration
☒ Maximum during

Fluid Factor: 1

Edit Secondary Parameters

Cancel OK

Kuva 31. Arviot huippukäytön ajasta. GLHEPro.



Kuva 32. Lämpöpumpun pisin käyntiaika ja energiankulutushuippu. GLHEPro.

Heating		Cooling		
<input type="checkbox"/> Average over duration		<input type="checkbox"/> Average over duration		
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum during duration		<input checked="" type="checkbox"/> Maximum during duration		
Duration:	17	Duration:	5	
Note that it is not necessarily the case that the best method for heating and cooling (average or maximum) will be the same.				
<div>Get Summary Data</div>				
	Total Loads [kW-h]		Peak Loads [kW]	
	Heating	Cooling	Heating	Cooling
January	49578	0	88	0
February	43865	0	88	0
March	43955	0	88	0
April	27316	0	88	0
May	21168	0	66	0
June	22455	0	80	0
July	24140	0	88	0
August	23616	0	79	0
September	19790	0	77	0
October	26898	0	88	0
November	37619	0	88	0
December	46393	0	88	0

Kuva 33. Tarvittavat lähtötiedot GLHEPron käyttöön. GLHEPro.

6.3 Simulointi

Kuvan 34 kohtaan 1 tuodaan aikaisemmin saadut kuukausittaiset lähtötiedot. Lähtötiedot syötetään kuvan 35 mukaiseen taulukkoon, jossa kopioitujen arvojen lisäksi myös arvio huippukäytön ajasta tulee syöttää alareunassa olevaan "Number of Peak Heating Hours"-kohtaan. Tämän jälkeen kohdassa 2 syötetään kaivon mitat eli haluttu porakaivon tehollinen syvyys sekä halkaisija. Kohteessa porakaivon syvyydeksi on määritelty 310 metriä sekä halkaisijaksi 4,5 tuumaa eli 114,3 mm. Kohdassa 3 syötetään kaivojen välinen etäisyys, jonka on oltava vähintään 15 metriä, jotta ne eivät vaikuta liikaa toisiinsa. Energiakaivojen etäisyydeksi haluttiin 20 metriä, mutta tontin ahtauden takia koulukohteen kaivojen etäisyydeksi syötettiin 18 metriä. [16; 17.]

GLHEPro - [untitled]

File Loads Units Action Help Register

Vertical BH Horizontal GHE FPFLS BH

Borehole Parameters

Active Borehole Depth : 310 m

Borehole Diameter : 114.3 mm

Borehole Thermal Resistance : 0.2775 $^{\circ}\text{K}/(\text{W}/\text{m})$

Borehole Spacing : 18 m

Borehole Geometry : LINE CONFIGURATION 12 : 1 x 12, line

Select Borehole

Calculate Borehole Thermal Resistance

Ground Parameters

Soil type currently entered : Testi

Thermal Conductivity of the ground : 3.000 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{K})$

Volumetric heat capacity of the ground : 2300.000 $\text{kJ}/(^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}^3)$

Average Annual Ground Temperature : 5.9 $^{\circ}\text{C}$

Temperature Profile Location : Unspecified, Unspecified

Select Ground Parameters

Select Ground Temperatures

Fluid Parameters

Total flow rate for entire system : 0.380 L/s

Fluid Type: Ethanol / Water

Fluid Concentration: 30%

Average Temperature at Peak Conditions: 3 $^{\circ}\text{C}$

Select Fluid

	Freezing Point	Density	Volumetric Heat Capacity	Conductivity	Viscosity
►	$^{\circ}\text{C}$	kg/m^3	$\text{kJ}/(^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}^3)$	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{K})$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
	-19.96	961.24	3913.42	0.412	0.00569

Heat Pump

Heat Pump Selected : Oma : Nibe 300 kW lämmitys, jäähdytys 17/23

Select Heat Pump

Kuva 34. GLHEPron etusivu. GLHEPro.

Edit Loads on Heat Pump

Heat Pump Loads

Month	Total Heating kWh	Total Cooling kWh	Peak Heating kW	Peak Cooling kW
January	49578	0	88	0
February	43865	0	88	0
March	43955	0	88	0
April	27316	0	88	0
May	21168	0	66	0
June	22455	0	80	0
July	24140	0	88	0
August	23616	0	79	0
September	19790	0	77	0
October	26898	0	88	0
November	37619	0	88	0
December	46393	0	88	0

Duration of Peak Loads

Number of Peak heating hours: 17 Number of Peak Cooling hours: 0

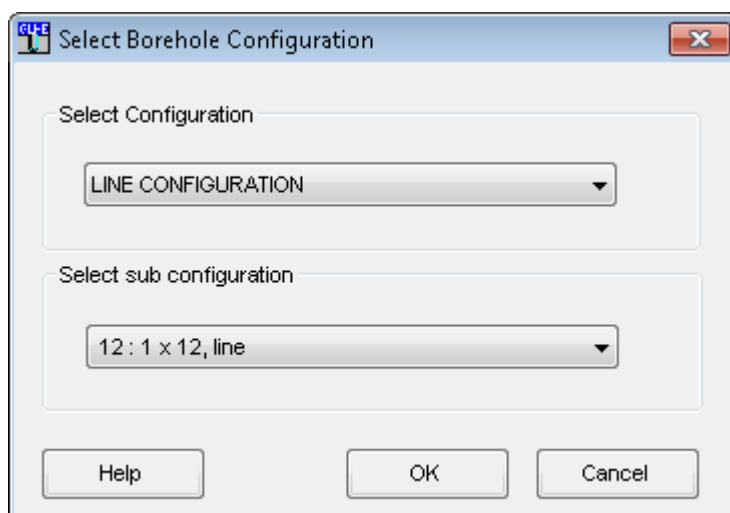
Clear Loads Copy Paste Cancel OK

Kuva 35. Lähtötietojen syöttäminen. GLHEPro.

Seuraavaksi eli kohdan 4 kautta valitaan kaivokentän geometria sekä arvioitu porakai-vojen lukumäärä (kuva 36). Porakaivojen geometrialla voidaan vaikuttaa simulointituloksiin, joten niitä vaihtamalla voidaan päästä haluttuihin arvoihin. Geometriaksi valittiin "Line Configuration" sekä kuvan 36 alempaan kohtaan tietysti haluttu kaivojen lukumäärä 12. Kohdassa 5 ja 6 valitaan maa- tai kallioperän ominaisuudet. Maaperän pintalämpötilalla sekä kallioperän lämmönjohtavuudella on isot vaikutukset simuloinnin lopputulokseen, joten näiden kanssa on oltava tarkka ja huolellinen. Geologian tutkimuskeskuksen nettisivujen avulla voidaan selvittää kallioperän ominaisuus ja irtomaakerroksen paksuus rakennuksen sijainnin perusteella. Mikäli GLHEPron kirjastosta ei löydy tarvittavaa maa- ja kallioperää ominaisuuksineen, voidaan sellainen luoda sekä sille voidaan määritellä haluttu lambda-arvo eli lämmönjohtavuus. Kun kohteessa on TRT-mittaus suorittamatta, ei simulointivaiheessa voida olla varmoja maan lämmönjohtavuudesta ja häiriöttömästä

lämpötilasta. Tämän takia asiantuntijan ohjeistuksella valittiin kuvan 37 mukainen kallio-perä "TESTI" sekä sille asetettu lämmönjohtavuus 3. Lämmönjohtavuus 3 on hyvä keskimääräinen arvo, jonka mukaan simuloidessa tulokset eivät ole liian optimistisia. Tällä saadaan simulointiin siis pientä varmuuskerrointa. [16; 17.]

GLHEPro laskee energiakaivon lämpövastuksen. TRT-mittauksen tuloksista saadaan maaperän häiriötön lämpötila ja kallion lämmönjohtokykyyn viittaavat arvot. Tämän pohjalta voidaan luoda GLHEProon uusi kallio-perälaji tarvittavilla arvoilla. Simuloitaessa korvataan kivilaji "TESTI", maaperän häiriötön lämpötila ja simuloidaan energiakaivokenttä todellisilla arvoilla. [17]



Kuva 36. Porakaivojen geometrian valinta. GLHEPro.

Soil Properties

Soil Description	Thermal Conductivity [W/(m·°K)]	Density [kg/m³]	Specific Heat [kJ/(kg·°K)]	Volumetric Heat [kJ/(°K·m³)]
Average Rock	2.4234	2803.2	0.836	2343.48
Dense Rock	3.462	3203.6	0.836	2678.21
Heavy Soil (Damp)	1.2982	2098.4	0.962	2018.66
Heavy Soil (Dry)	0.8957	1601.8	1.046	1675.48
Heavy Soil (Sat.)	2.4234	3203.6	0.836	2678.21
Light Soil (Damp)	0.8657	1601.8	1.046	1675.48
Light Soil (Dry)	0.3445	1441.6	0.836	1205.18
Black Cotton Soil	1.0978	304.34	10.0486	3058.22
Red Soil	1.0002	300	9.9984	3000
Sand-Gypsum	1.04	352.4	11.3047	3983.73
Killegneissi (mic...	2.66	2750	0.71	1952
Testi	3	3000	0.78	2300
Karin kampus ma...	3.3	3000	0.9	2700

Selected Data is User Specified

Select Cancel

Library Utility

Export Import

Maintenance

Add Modify Delete

Search Show All

Kuva 37. Maaperän valinta. GLHEPro.

GLHEProssa rakennuksen sijainti valitaan paikasta "Station". Eri leveysasteilla sijaitsevilla paikkakunnilla on eri maanpinnan häiriötön lämpötila. Maan häiriöttömällä lämpötilalla tarkoitetaan maan lämpötilaa ennen energiajärjestelmän käyttöönottoa. GLHEPron antaman sijainnin mukaan määriteltyn maanpinnan lämpötilaan tulee lisätä +1...+1,5 °C, riippuen energiakaivon syvyydestä. Kuvan 38 mukaisesti kohteen paikkakunnaksi on valittu Kuopio. Ohjelmisto antaa maanpinnan lämpötilaksi 4,9 astetta, johon tulee siis lisätä vielä yksi aste. Kohdassa 7 määritellään lämmönkeruuneste ja sen tietoja (kuva 39), kuten termodynaamiset ominaisuudet. Suomessa käytettävä lämmönkeruuneste on etanoli-vesi-seos, jonka vahvuus on yleisimmin 30 % sekä keskilämpötila 3 °C. [16; 17.]

Select Soil Temperature Profile

By Location List | By Latitude/Longitude | Constant User Specified

Use the list boxes to load the records for your country into the table below.

Site Parameters

Region: EUROPE

Country: Finland

Ground Cover

☐ Short grass

☒ Tall grass

Search Table

View Temperature Profile

Cancel

OK

Select the best record for your location:

Station	Average Temperature [°C]	Latitude	Longitude
KEMI	3.12	65.78	24.58
KEVO	0.1	69.75	27.03
KUOPIO	4.9	63.02	27.8
KUUSAMO	1.3	65.97	29.18
LAHTI	5.22	60.97	25.63
LAPPEENRANTA	5.34	61.05	28.2

Note: These are undisturbed ground temperatures. Actual ground temperatures will vary, especially in urban areas. See Appendix D of User Manual for more information.

Kuva 38. Paikkakunnan valinta. GLHEPro.

Select Antifreeze Mixture

Select Fluid Characteristics

Fluid Type: Ethanol / Water

Concentration (Wt%): 30

Mean Temperature: 3

Calculate Properties

Fluid Type: Ethanol / Water

Average Temperature at Peak Conditions: 3°C

Fluid Concentration: 30%

Library

Freezing Point	Density	Volumetric Heat Capacity	Conductivity	Viscosity
°C	kg/m³	kJ/(°K·m³)	W/(m·°K)	Pa·s
-19.96	961.24	3913.42	0.412	0.00569

Close

Kuva 39. Lämmönkeruunesteen tietojen syöttäminen. GLHEPro.

Kohdassa 8 määritetään porakaivon lämpövastus. Tämän vaiheen sisältämiä kohtia voidaan tarkastella kuvasta 40, jossa oleva "Calculate Borehole Resistance" tulee suorittaa aina kun vaihdetaan jotakin arvoa. Samassa vaiheessa olevasta alemmasta "Set"-painikkeista valitaan putkikoko PN10 ja DN40. "Grout"-kohtaan syötetään veden ominaislämpökapasiteetti $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, muutettuna tilavuutta kohti eli veden volumetrinen lämpökapasiteetti $4\,220 \text{ kJ}/(\text{K}\cdot\text{m}^3)$ ja "Thermal Grout" -kohtaan veden lämmönjohtavuus

0,566 W/(m*K). GLHEPron käyttöohjeessa lukee, että Skandinavian maissa pystysuoraan porattujen kaivojen annetaan täyttyä vedellä maataytön sijaan ja siksi edellä mainittuihin kohtiin annetaan veden arvoja. Seuraavaksi kohdasta 9 valitaan lämpöpumppu (kuva 41), jonka jälkeen voidaan suorittaa simulointi kohdan 10 simulointinappia painamalla. [16; 17.]

Borehole Specification

Borehole Diameter (d): 114.3 mm

Shank Spacing (s): 20.32 mm

U-Tube Inside Diameter (D1): 32.6 mm

U-Tube Outside Diameter (D2): 40 mm

Volumetric Flow Rate/borehole: 0.031666666 L/s

Fluid Factor: 1 Unless (multiply fluid in the system by this amount)

Borehole Fill

☒ Grout ☐ Groundwater

Constrained By: ☐ Heating ☒ Cooling

Volumetric Heat Capacities

Soil: 2300.000 kJ/(K·m³)

Grout: 4220.000 kJ/(K·m³)

Pipe: 1542.000 kJ/(K·m³)

Thermal Conductivities

Soil: 3.000 W/(m·K)

Grout: 0.566 W/(m·K)

Pipe: 0.389 W/(m·K)

Options for specifying the fluid convection coefficient

☐ Entered Value
Convection Coefficient: 55.100 W/(m²·K)
Reynolds Number: N/A

☒ Calculated Value
Fluid Type: Ethanol / Water
Fluid Concentration: 38%
Average Temperature at Peak Conditions: 3°C

	Freezing Point	Density	Volumetric Heat Capacity	Conductivity	Viscosity
►	°C	kg/m³	kJ/(K·m³)	W/(m·K)	Pa·s
	-19.96	961.24	3913.42	0.412	0.00569

Short Circuiting Effects

☒ Short Circuiting Effects

Model Type: ☐ Uniform wall temperature ☐ Uniform heat flux ☒ Mean

G-Function Calculations

Calculate Borehole Resistance

Export G-Function to File

Borehole Resistance: 0.2775 W/(m·K)

OK Cancel

Kuva 40. Porakaivon lämpövastuksen määrittäminen. GLHEPro.

Select Heat Pump

Currently Selected Pump is from the User Library

Brand Name : Oma

Model : Nibe 300 kW lämmitys, jäähdytys 17/23

Cooling
 Heat of Rejection = $QC[a + b(EFT) + c(EFT^2)]$ (kW)
 Power = $QC[d + e(EFT) + f(EFT^2)]$ (kW)

a: 1.073492 d: 0.073494
 b: 0.001129 e: 0.001129
 c: 0.000049 f: 0.000049

Heating
 Heat of Absorption = $QH[u + v(EFT) + w(EFT^2)]$ (kW)
 Power = $QH[x + y(EFT) + z(EFT^2)]$ (kW)

u: 0.667440 x: 0.332560
 v: 0.006184 y: -0.006184
 w: 0.000002 z: -0.000002

QC = Cooling load (kW)
 QH = Heating load (kW)
 EFT = Fluid temperature entering the Heat pump (°C)

☐ Export data to HVACSIM+ Type 565 parameter file

Select Cancel

Library Utility
 Import
 Export

Maintenance
 Add
 Modify
 Delete

View Data
 Cooling Loads
 Heating Loads
 View Curve

Kuva 41. Lämpöpumpun valinta. GLHEPro.

Simulointien tulokset tallentuvat excel-tiedostoon (kuva 42), josta ne kopioidaan ja syötetään aputyökaluun (kuva 43). Simuloinnista saatavia tietoja ovat keruuteho, lämpöpumpun sähkönkulutus, liuosten lämpötilojen keskiarvo sekä etanolin keskimääräiset, meno- ja paluulämpötilojen minimi- ja maksimiarvot. Tämän aputyökalun avulla Excel muodostaa kuvan 44 mukaisen tuloksen. Tässä vasemmalta oikealle liikkuva käyrä tulee pysyä lämpötilan 0 °C yläpuolella. Käyrä kuvastaa etanolin keskimääräistä paluulämpötilaa lämpöpumpulta sekä menolämpötilaa lämpöpumppuun vuosien edetessä. Mikäli se menee reilusti lämpötilan 0 °C alapuolelle, tulee simulointi suorittaa uudelleen, esimerkiksi porakaivojen syvyyksiä, määrää ja etäisyyttä muuttamalla. Myös lämpöpumpun valinnalla vaikutetaan suuresti lopputulokseen. Kun tulos on kuvan 44 mukainen, voidaan suorittaa laskelmia tulosten varmistamiseksi. [17]

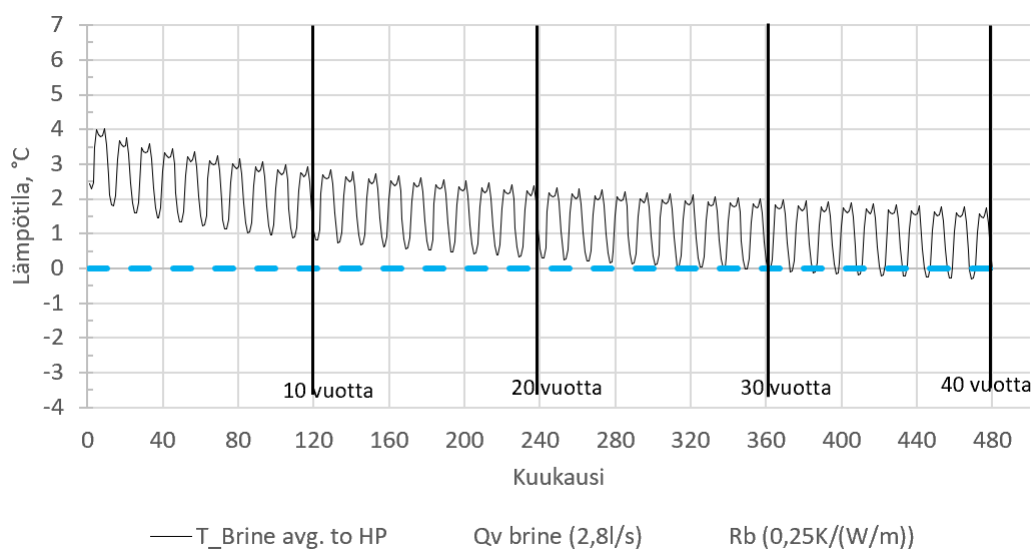
Laskelmissa luodaan excel-taulukkoon (kuva 45) sarakkeet "Lämpöpumpun tuotto", "Lämpöpumpun kuluttama sähkö" sekä "Kaivokentästä haettu energia". Lämpöpumpun kuluttama sähkö saadaan GLHEPron simulointituloksista kohdasta "Power" ja vastaa- vasti lämpöpumpun tuoton arvoiksi laitetaan samat, mitä GLHEPron lähtötietoihin syö- tettiin. Lämpöpumpun tuotto ja lämpöpumpun kuluttama sähkö erotetaan toisistaan, jol- loin vastaukseksi saadaan kuukauden aikana kaivokentästä haettu energia. SCOP eli vuosihyötysuhde saadaan, kun lämpöpumpun tuotto jaetaan lämpöpumpun kuluttamalla sähköllä. Energiaa otetaan lämpökaivosta keskimäärin vuodessa 71 kWh/kaivometri, joka saadaan, kun kaivokentästä haettu energia jaetaan keruuputkiston metreillä. Keruu- putkiston metrit saadaan kaivojen määrän ja tehollisen syvyyden tulosta, joka kerrotaan kahdella.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time	Q	Power	Tf	Average Ex	Average EV	Minimum E	Maximum EWT	
2	1	12,22616	15739,97	1,049712	-0,33384	2,433269	2,433269	2,433269	
3	2	11,95931	13968,69	0,923574	-0,42979	2,276933	2,276933	2,276933	
4	3	10,8427	13945,94	1,239537	0,012538	2,466536	2,466536	2,466536	
5	4	7,026507	8496,235	2,680688	1,885542	3,475833	3,475833	3,475833	
6	5	5,293181	6518,19	3,378616	2,77962	3,977611	3,977611	3,977611	
7	6	5,79578	6931,609	3,198717	2,542845	3,854588	3,854588	3,854588	
8	7	6,025736	7462,721	3,099346	2,417452	3,781241	3,781241	3,781241	
9	8	5,896156	7297,358	3,13707	2,469839	3,8043	3,8043	3,8043	
10	9	5,115134	6089,647	3,433179	2,854331	4,012026	4,012026	4,012026	
11	10	6,700912	8352,053	2,802608	2,044308	3,560907	3,560907	3,560907	
12	11	9,609343	11881,38	1,612796	0,525368	2,700225	2,700225	2,700225	
13	12	11,40729	14821,32	0,820538	-0,47035	2,111429	2,111429	2,111429	
14	13	12,15763	15929,63	0,439159	-0,93664	1,814961	1,814961	1,814961	
15	14	11,90896	14094,55	0,465481	-0,88218	1,813143	1,813143	1,813143	
16	15	10,80421	14052,45	0,852379	-0,37027	2,075024	2,075024	2,075024	
17	16	7,004425	8555,381	2,333747	1,541101	3,126393	3,126393	3,126393	
18	17	5,278121	6559,871	3,06271	2,465418	3,660001	3,660001	3,660001	
19	18	5,780427	6972,73	2,905036	2,250902	3,55917	3,55917	3,55917	
20	19	6,010491	7504,915	2,819084	2,138915	3,499253	3,499253	3,499253	
21	20	5,881684	7337,412	2,865087	2,199494	3,53068	3,53068	3,53068	
22	21	5,10309	6121,905	3,171632	2,594148	3,749116	3,749116	3,749116	

Kuva 42. Simuloinnin tulokset, kuten keruuteho, lämpöpumpun sähkönkulutus, liuosten lämpöti- lojen keskiarvo ja etanolin lämpötiloja paluu- ja menopuolella.

Kuukausi	Keruuteho	Lämpöpumpun sähkönkulutus	Liuosten lämpötilojen keskiarvo	Etanolin keskimääräinen paluulämpötila	Etanolin keskimääräinen menolämpötila	Etanolin minimi menolämpötila	Etanolin maksimi menolämpötila
1	12,23	15739,97	1,05	-0,33	2,43	2,43	2,43
2	11,96	13968,69	0,92	-0,42	2,28	2,28	2,28
3	10,84	13945,94	1,24	0,01	2,47	2,47	2,47
4	7,03	8596,235	2,68	1,89	3,48	3,48	3,48
5	5,29	6518	3,38	2,78	3,98	3,98	3,98
6	5,8	6931	3,2	2,54	3,85	3,85	3,85
7	6	7462	3,1	2,42	3,78	3,78	3,78
8	5,9	7297	3,13	2,47	3,8	3,8	3,8
9	5,1	6089	3,43	2,85	4,01	4,01	4,01
10	6,7	8352	2,8	2,04	3,56	3,56	3,56
11	9,6	11881	1,61	0,53	2,7	2,7	2,7
12	11,4	14821	0,82	-0,47	2,11	2,11	2,11
13	12,2	15929	0,44	-0,94	1,81	1,81	1,81
14	11,9	14094	0,47	-0,88	1,81	1,81	1,81
15	10,8	14052	0,85	-0,37	2,08	2,08	2,08
16	7	8555	2,33	1,54	3,13	3,13	3,13
17	5,3	6559	3,06	2,47	3,66	3,66	3,66
18	5,8	6972	2,9	2,25	3,56	3,56	3,56
19	6	7504	2,82	2,14	3,5	3,5	3,5
20	5,9	7337	2,87	2,2	3,53	3,53	3,53

Kuva 43. Simuloinnin tulosten syöttäminen. Granlund Oy.



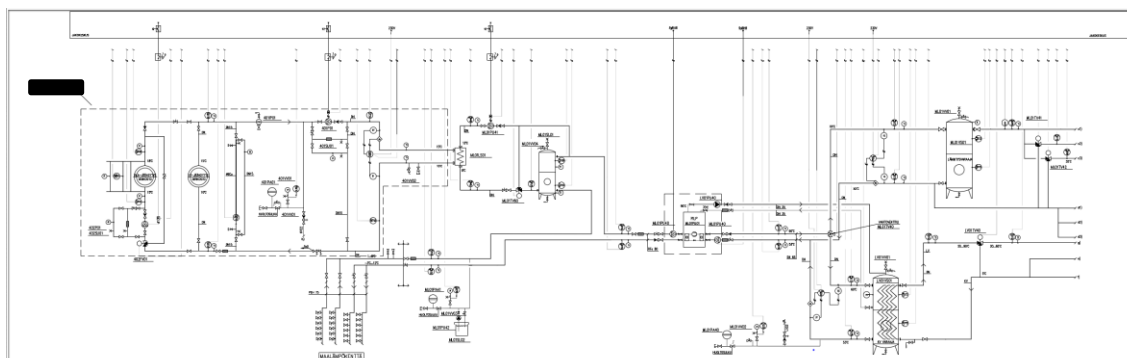
Kuva 44. Tulosten tarkastelu, liuoslämpötilat ja lämpötilaraja. Granlund Oy.

1.vuosi	Lämpöpumpun tuotto	Lämpöpumpun kuluttama sähkö	Kaivokentästä haettu energia
1	49578	15739,96804	33838,03196
2	43865	13968,68722	29896,31278
3	43955	13945,93949	30009,06051
4	27316	8496,234505	18819,7655
5	21168	6518,189684	14649,81032
6	22455	6931,60883	15523,39117
7	24140	7462,721342	16677,27866
8	23616	7297,357688	16318,64231
9	19790	6089,647213	13700,35279
10	26898	8352,052578	18545,94742
11	37619	11881,37832	25737,62168
12	46393	14821,32405	31571,67595
Summa	386793	121505,109	265287,891
	SCOP	3,183347625	
	Kaivokentän kokonaissyvyys	3720 m	
	Keruuenergia kaivokentästä	71,3139492 kWh/m/a	

Kuva 45. Tulosten tarkastelua. Lämpöpumpun tuotto, lämpöpumpun kuluttama sähkö ja energia-kaivosta otettu energia.

6.4 KytKentäkaavio

Kuvassa 46 on esitetty kohteen kytKentäkaavio. Vasemmalla alareunassa on kuvattu energiakaivot, joita kohteessa on 12. Energiakaivoilta oikealle siirryttäessä on kohteen toinen kahdesta paisunta-astiasta. Runkoputkistoa eteenpäin jatkettaessa kiertää neste säiliön ML01SL01 kautta lämpöpumpulle MLP, joka sijaitsee keskellä kytKentäkaaviota, hieman oikealla puolella. 3-tieventtiili ML01TV60 kierrättää nesteen lämmönsiirtimen ML01LS01 kautta, mikäli jäähdytykselle on tarvetta. Maalämpöpumpun vasemmalla puolella kuvanlukusuunnasta katsottuna kiertää alkoholipitoinen lämmönkeruuneste, kun taas oikealla puolella vesi. Maalämpöpumpun oikealla puolella oleva vaihtventtiili ML01TV40 määrittää lämpöpumpulta lähtevän veden määränpään sen perusteella, onko tarvetta lämpimälle käyttövedelle vai ei. Lämpimälle käyttövedelle sekä lämmitykseen käytettävälle vedelle on omat varaajansa. Lämpimän käyttöveden varaaja on kytKentäkaaviossa merkattu positiotunnuksella LV01VS01 ja lämmitysverkoston varaaja ML01VS01.



Kuva 46. Kytkentäkaavio. Granlund Oy. Koulukohteen kytkentä.

6.5 Toimintaselostus

Toimintaselostus luotiin kuvaamaan kohteen lämmön- ja jäähdytysentantojärjestelmien toimintaa, joita ohjaa kaksi automaation tasoa: lämpöpumpun sisäinen automaatio sekä kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmä. Lämmitysjärjestelmiä kohteessa ovat patteriverkosto, lattialämmitysverkosto sekä IV-lämmitysverkosto. [19]

Lämpöpumppujärjestelmässä lämpöpumppujen toiminnasta vastaa rakennusautomaatio, joka antaa käynti- ja pysäytyskäskyt lämmitysenergian tuottamisesta. Lämmitysenergiaa tuotetaan varaajiin ML01VS01 ja LV01VS01. Ulkoisen rakennusautomaation avulla ohjataan lämpöpumpun tehoportaita sekä vaihtuventtiiliä ML01TV40. Kiertovesipumppujen kierrosluvun ohjaamisesta vastaa lämpöpumpun oma automaatio. Lämmitysvaraajasta lähtevän veden lämpötila-anturin ML01TE45 kohdalla lämpöpumppu pyrkii pitämään lämmityskäyrän mukaisena. [19]

Lämmintä käyttövetä tarvittaessa lämpöpumppu ML01MLP01 tuottaa lämpöenergiaa vaihtuventtiilin ML01TV40 kautta varaajaan LV01VS01. Mikäli lämmitysvaraajan lämmitämiseen ei ole tarvetta, vain tällöin lämpöpumpulla voidaan lämmittää käyttövesivaraajaa ja vaihtuventtiilillä on lupa kääntyä käyttövesivaraajan suuntaan. Kun lämpöpumpun sisäiset tulistuslämpötila-anturit ylittävät varaajan yläanturin LV01TE41 lämpötilan, tuottaa lämpöpumppu tulistusenergiaa varaajaan LV01VS01. [19]

Lämpöenergiansa lämpöpumppujärjestelmän liuospiiri saa jäähdytysverkoston lauhdeesta sekä maalämpökentästä. Tavoitteena on ensisijaisesti hyödyntää jäähdytysverkosta saatava lauhde ja tarvittaessa lisätään lämpöenergian saantia. Lämpöpumpun tehon mukaisesti säädetään lämpöpumpun lauhde- ja höyrystinpumppuja. Lauhduttimen lämpötilaerona pyritään pitämään 7 kelviniä ja höyrystimen lämpötilaerona 4 kelviniä. Kun lämpöpumppukoneikko saa käyntikäskyn, höyrystin- ja lauhdepumput käynnistyvät ja vastaavasti lämpöpumppukoneikon saadessa pysähtymiskäskyn, pumput pysähtyvät. [19]

Lauhdelämpöä jäähdytysverkostosta tuodaan liuospiirin lämmönsiirtimen ML01LS01 välityksellä. Siirtimen liuospuolen menovirtaaman lämpötila pyritään pitämään venttiilin ML01TV60 avulla +8 asteessa sekoittamalla ensiöpuolen paluuliuosta ja jäähdytysvaraajan kylmää liuosta. Virtaamaa säädetään pumpun ML01PU41 avulla siten, että lämpötilaero 5 kelviniä siirtimen yli toteutuu. Lämpötilan alittaessa +2 astetta tulee pumpun ML01PU41 pysähtyä ja antaa rakennusautomaatiojärjestelmään hälytys. [19]

Lämmitysverkostojen sekä käyttöveden menojohdojen lämpötilaa pyritään pitämään asetusarvossaan, omien lämpötila-antureidensa avulla. Lämmitysverkostoissa lämmityksen asetusarvo seuraa asetettua ulkolämpötilasta riippuvaa lämpökäyrää. Jokaisella lämmitysverkostolla on oma lämpökäyrän mukainen asetusarvonsa. Lattialämmitys- sekä patteriverkostossa menojohdon lämpötilaa säädetään sekoittamalla varaajan ja verkoston paluunestettä keskenään. Kun lämpötila menojohdossa alittaa verkostoille määrätty asetusarvot tietyllä lämpötilalla, on kaukolämmön säätöventtiileillä lupa avautua. IV-lämmitysverkostossa menoveden lämpötila pyritään pitämään asetusarvossaan venttiilin IV01TV40 sekoituksella. Kun lämpötila alittaa määritetyn asetusarvon 2 kelvinillä, on kaukolämmön säätöventtiileillä lupa avautua. Lämmintä käyttövettä pidetään asetusarvossaan sekoittamalla varaajalta tulevaa, kierron paluusta ja kylmävesisyötöstä tulevaa vettä. Kun lämpötila alittaa sille määritellyn asetusarvon 2 kelvinillä, on kaukolämmön venttiileillä lupa avautua. [19]

7 Yhteenveto

Insinööriytyön tavoitteena oli maalämpöpumppujärjestelmän mitoittamiseen liittyvien vaiheiden kokonaisvaltainen ymmärtäminen sekä osaamisen kehittäminen. Maalämpöjärjestelmän suunnittelun vaiheita on kuitenkin monia, ja on itsestään selvää, että vaiheiden kokonaisvaltainen ymmärtäminen ja laaja osaaminen vaativat reilusti työtunteja.

Työn tuloksena syntyi kuitenkin kattava kokonaisuus suunnittelun eri vaiheista sekä haluttua simulointiohjelmiston käytön osaamista saatiin Kuopion Granlundille. Insinööriytyössä paneuduttiin hankittaviin lähtötietoihin, niiden tulkitsemiseen sekä energiakaivokentän simulointiin. Työtä hankaloitti hieman projektin yhteistyö, jossa kaukolämmön sekä maalämmön jäähdytyspuolen suunnittelusta vastasi toinen yritys. Tarvittavia lähtötietoja laitteistojen, kuten lämmönsiirtimeen ja venttiilien, mitoittamiseen ei vielä insinööriytyön aikana ollut saatavilla. Lisäksi työstä ja sen vaiheita jäisi selkeämpi kuva, jos niitä ei suoritettaisi yhteistyönä.

Simulointiohjelmistoon ja muihin työn vaiheisiin vaadittavat koulutukset onnistuivat hyvin sekä yleisesti ottaen maalämpöosaaminen henkilökohtaisella tasolla on kehittynyt. Projektin avulla kehitettiin työssä vaadittavia taitoja, jotka ovat eduksi tulevaisuutta ajatellen.

Lähteet

- 1 Tietoa Granlundista. Verkkoaineisto. Granlund Oy. <<https://www.granlund.fi/>>. Luettu 27.12.2019
- 2 Tietoa Granlundista. Verkkoaineisto. Granlund Kuopio Oy. <<https://www.granlund.fi/yhteys/kuopio/>>. Luettu 27.11.2019
- 3 Lehtikainen, Tuomas. 2020. Osastonjohtaja, Granlund Kuopio Oy. Kuopio. Haastattelu 08.01.2020.
- 4 Energiakaivo. 2014. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://pipelife-cms.com/media/fi/sidosryhmajulkaisut/Ymparistoministerio/Energiakaivo-2014.pdf>> Luettu 27.12.2019
- 5 Keski-Suomen Geoenergiapotentiaali. 2015. Verkkoaineisto. Keski-Suomen Liitto. <https://www.keskisuomi.fi/filebank/24387-Keski-Suomen_geoenergiapotentiaali_4162018_loppuraportti.pdf> Luettu 7.1.2020.
- 6 GeoFoorumi. 2008. Verkkoaineisto. GTK. <http://www.gtk.fi/export/sites/i/ajan-kohta/viestintamateriaalit/geofoorumi/arkisto/geoorumi1_08web.pdf> Luettu 7.1.2020
- 7 Lämpöpumput. 2019. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput> Luettu 25.12.2019
- 8 Maalämpö. 2018. Verkkoaineisto. Tom Allen Senner. <<https://www.tomallensenner.fi/maalampo>> Luettu 27.12.2019
- 9 Maalämpöpumput, MLP. 2019. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp> Luettu 25.12.2019
- 10 Energiakenttä: Maalämpöjärjestelmä isoon kiinteistöön. Verkkoaineisto. Geodrill. <<http://www.geodrill.fi/energiakentat/>> Luettu 26.12.2019
- 11 Lämpöä kotiin keskitetysti. 2012. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa_kotiin_keskitetysti_Kaukolampo.pdf> Luettu 26.12.2019
- 12 Kaukolämpö. 2019. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo> Luettu 25.12.2019

- 13 MagiCAD kotisivut. Verkkoaineisto. MagiCAD. <<https://www.magicad.com/fi/>> Luettu 9.1.2020.
- 14 MagiCAD ROOM. Verkkoaineisto. MagiCAD. <https://www.magicad.com/fi/mc_software/magicad-room/#ominaisuudet-autocadille> Luettu 9.1.2020.
- 15 RIUSKA. Help – Energy and thermal simulation tool for buildings. Granlund Oy. Luettu 9.1.2020.
- 16 School of Mechanical Aerospace Engineering Oklahoma State University. GLHE-PRO. 2016. Users` Guide. Luettu 11.1.2020.
- 17 Koskimäki, Toni. 2020. Energia-asiantuntija, Granlund Consulting Oy. Helsinki. Puhelinkeskustelu 16.01.2020.
- 18 GLHEPro Version 5.0 New Features. 2016. Verkkoaineisto. Oklahoma State University. <https://hvac.okstate.edu/sites/default/files/pubs/glhepro/GLHE-Pro_New_Features.pdf> Luettu 16.1.2020
- 19 Koulukohde. 2019. Toimintaselostus. Granlund Oy.
- 20 TRT-mittaus. 2018. Verkkoaineisto. Lapon. <<https://www.lapon.fi/trt-mittaus>> Luettu 27.12.2019

Haastattelu

1. Maalämpösuunnittelu Kuopion Granlundilla ennen insinööriytöä
 2. Maalämpösuunnittelu Kuopion Granlundilla tulevaisuudessa
 3. Kaukolämmön hyödyt koulukohteessa
-